

# DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

---

## Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen

## Behaviour of Concrete at High Temperatures

von

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Schneider  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Universität Gesamthochschule Kassel

vormals

Institut für Baustoffe, Massivbau  
und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig



BERLIN 1982

VERTRIEB DURCH VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN  
BERLIN – MÜNCHEN

# Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das mechanische und physikalische Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen untersucht. Die Arbeiten stehen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Spannbetondruckbehältern für Kernkraftwerke und der Erforschung des Brandverhaltens von Stahlbetonbauteilen. In dem Bericht wird versucht, den gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse über physikochemische Prozesse sowie physikalische und mechanische Eigenschaften von Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung zusammenzufassen. Der untersuchte Temperaturbereich erstreckt sich von 20 °C bis hinauf zur Schmelztemperatur von Beton bei 1350 °C.

Im ersten Teil der Arbeit wird die thermische Stabilität von Beton behandelt, im wesentlichen auf der Grundlage eigener Forschungsarbeiten, wobei spezielle thermoanalytische Untersuchungen wie Differentialthermoanalyse und Thermogravimetrie betrachtet werden. Die thermisch bedingten Zersetzungs- und Umwandlungsreaktionen im Beton werden diskutiert. Die damit verbundenen Reaktionswärmen sind angegeben. Besondere Aufmerksamkeit ist den Schmelz- und Ablationswärmen gewidmet.

Die physikalischen Hochtemperatureigenschaften von Beton wie Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitung und thermische Dehnung sind im zweiten Teil des Berichts behandelt. Die Ergebnisse geben eine umfassende Übersicht über die physikalischen Eigenschaften selbst und über diejenigen Reaktionen, die ihre Veränderungen im Temperaturbereich von 20 °C bis 1350 °C verursachen.

Im dritten Teil der Arbeit werden verschiedene Versuchsmethoden zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen beschrieben. Zwei Arten von Temperaturbeanspruchungen während der Versuche werden diskutiert: stationäre und instationäre Temperatureinwirkungen. Daran anschließend werden die mechanischen Hochtemperatureigenschaften von Beton – z. B. Druck- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Kriechen, Schwinden und verschiedene Arten von residuellen Eigenschaften – behandelt. Das charakteristische thermische Verhalten von Beton wird aufgezeigt und diskutiert. Die Versuche zeigen ein unterschiedliches Verhalten des Betons, je nachdem ob vorgetrocknete, versiegelte oder unversiegelte Proben zur Anwendung kommen. Dieser Teil des Berichts gibt eine umfassende Übersicht über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von verschiedenen Arten von Konstruktionsbetonen während und nach einer vorausgegangenen Temperaturbeanspruchung.

## Behaviour of Concrete at High Temperatures

### Summary

In the present report the mechanical behaviour of concrete and the physical properties of concrete under the action of high temperatures has been investigated in connection with the development of prestressed concrete pressure vessels for nuclear reactors and also in the context of research on the behaviour of reinforced concrete structural components under fire attack. With the report it is endeavoured to present a summarizing review of the state of knowledge concerning the physico-chemical processes and the physical and mechanical properties of different concretes under temperature attack. The range of temperatures considered here extends from 20 °C up to the melting point of concrete at about 1350 °C.

In the first part of the report the thermal stability of concrete is dealt with, mainly on the basis of own research works, with special reference to thermoanalytical investigations such as differential thermal analysis and thermogravimetric analysis. The thermally caused degradation and transformation reactions in concrete are discussed and the associated heats of reaction are indicated. Particular attention is paid to the heats of melting and ablation.

The high temperature physical properties of concrete – such as density, specific heat, thermal conductivity and thermal expansion – are considered in the second part of the report. The results offer a comprehensive account of the high temperature physical properties and the reactions causing changes in them, for the whole range of temperatures from 20 °C to 1350 °C.

In the third part of the report different test methods for the determination of mechanical properties of concrete at high temperatures are described. Two types of temperature exposure during the tests are discussed: steady state and transient state temperature conditions. Thereafter the high temperature mechanical properties of concrete – such as compressive and tensile strength, modulus of elasticity, creep, shrinkage and different types of residual properties e.g. – are considered. The thermal characteristics of concrete are presented and discussed. The tests indicate a different behaviour of concrete if the tests are performed with predried, with sealed or unsealed specimens. This section of the report offers a comprehensive account of the important mechanical properties of different types of structural concrete during and after a temperature exposure.

## Le Comportement du Béton sous l'Influence de hautes Températures

### Résumé

Dans l'étude y présentée le comportement mécanique du béton et des propriétés physiques du béton sous l'influence de hautes températures a été examiné à maintes reprises lors de la mise au point des réservoirs sous haute pression des réacteurs nucléaires en béton précontraint, ainsi que dans le cadre des recherches concernant les dangers pour les éléments en béton armé par les incendies. Dans le présent rapport l'essai est entrepris de présenter dans son ensemble l'état actuel des connaissances des phénomènes physico-chimique et des propriétés physiques et mécaniques des béton différentes sous l'influence de la chaleur. Font l'objet l'étude les températures entre 20 °C jusqu'au le point de fusion environ 1350 °C.

Dans la première partie de l'étude la stabilité thermique du béton est traitée. Il s'agit en premier plan d'essais thermoanalytiques, telle que l'analyse thermodifférentielle et thermo-gravimétrique. Les réactions thermiques de décomposition et de conversion du béton sont discutées avec indication des chaleurs dégradées par ces réactions. L'attention particulière est consacrée vers les chaleurs de fusion et d'ablation.

Dans la deuxième partie de l'étude on a rassemblé les propriétés physiques du béton sous haute températures, telle que densité, chaleur spécifique, conductibilité thermique et dilatation thermique. Le présent rapport comprend donc une étude de toutes les caractéristiques du béton sous hautes températures et des réactions qui mènent à leur changement dans la plage complète des températures entre 20 °C jusqu'à 1350 °C.

Dans la troisième partie de l'étude les méthodes différentes pour la détermination des propriétés mécaniques du béton aux températures élevées été décrit. Deux manières d'apparition des températures dans l'essai sont discutées: des températures stationnaires et des températures variables. Après cela on a rassemblé les propriétés mécaniques du béton sous haute températures, telle que résistance à la compression et trait, module d'élasticité, fluage, retrait et des propriétés résiduelles différentes par exemple. Les caractéristiques thermiques du béton sont présentées et discutées. L'essai indique un comportement différent du béton quand on a exécuté des expériences avec des éprouvettes séchés, scellés ou non-scellés. Cette partie de rapport comprend donc une étude de toutes les propriétés mécaniques importantes du matériau béton avec des compositions différentes en fonction de la température.

InhaltsverzeichnisContent

	Seite		Page
1. Einleitung	8	1. Introduction	8
1.1. Allgemeines	8	1.1. General Comment	8
1.2. Problemstellung	8	1.2. Objective	8
2. Abbaureaktionen im Beton bei hohen Temperaturen	11	2. Degradation reactions in concrete at high temperatures	11
2.1. Thermoanalytische Betonuntersuchungen	11	2.1. Thermal analytical investigations on concrete	11
2.2. Bestimmung der Reaktionswärmen	14	2.2. Determination of heat of reaction	15
2.3. Ablation, Schmelzwärme und Erosion von Beton	18	2.3. Ablation, heat of melting and erosion of concrete	18
2.4. Literatur	22	2.4. Literature	22
3. Physikalische Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen	23	3. Physical properties of concrete at high temperatures	23
3.1. Allgemeines	23	3.1. General	23
3.2. Dichte	24	3.2. Density	24
3.3. Spezifische Wärmekapazität	25	3.3. Heat capacity	26
3.4. Wärmeleitfähigkeit	28	3.4. Thermal conductivity	28
3.5. Temperaturleitfähigkeit	32	3.5. Thermal diffusivity	32
3.6. Wärmedehnung	34	3.6. Thermal strain	33
3.7. Literatur	39	3.7. Literature	39
4. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Beton mit verschiedenen Versuchsmethoden	40	4. Determination of mechanical properties of concrete by different test methods	40
4.1. Versuchsmethoden	40	4.1. Test methods	40
4.2. Versuchsdurchführungen	44	4.2. Test procedures	44
4.3. Anwendung von Versuchsdaten	49	4.3. Practical use of data	49
4.4. Literatur	50	4.4. Literature	50

## Inhaltsverzeichnis (Forts.)

## Content (cont.)

	Seite		Page
5. Mechanische Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen	50	5. Mechanical properties of concrete at high temperatures	50
5.1. Allgemeines	50	5.1. General	50
5.2. Druckfestigkeit	51	5.2. Compressive strength	51
5.2.1. Versuchsergebnisse	51	5.2.1. Test results	51
5.2.2. Literatur	57	5.2.2. Literature	57
5.3. Elastizitätsmodul	60	5.3. Modulus of elasticity	60
5.3.1. Versuchsergebnisse	60	5.3.1. Test results	60
5.3.2. Literatur	64	5.3.2. Literature	64
5.4. Spannungs-Dehnungs-Beziehung	65	5.4. Stress - strain relationship	65
5.4.1. Versuchsergebnisse	65	5.4.1. Test results	65
5.4.2. Literatur	69	5.4.2. Literature	69
5.5. Kriechen, Relaxation und Schwinden	70	5.5. Creep, relaxation and shrinkage	70
5.5.1. Stationäre Versuche bei $T > 150^{\circ} \text{C}$	70	5.5.1. Steady state tests at $T > 150^{\circ} \text{C}$	70
5.5.2. Stationäre Versuche bei $T < 250^{\circ} \text{C}$	75	5.5.2. Steady state tests at $T < 250^{\circ} \text{C}$	75
5.5.3. Literatur	79	5.5.3. Literature	79
5.6. Instationäres Kriechen und Zwängungen	81	5.6. Transient creep and restraining forces	81
5.6.1. Instationäre Kriechverformungen	81	5.6.1. Transient creep strains	81
5.6.2. Zwängungen bei veränderlichen Temperaturen	85	5.6.2. Restraining forces under transient temperatures	85
5.6.3. Literatur	89	5.6.3. Literature	89
5.7. Zugfestigkeit und Torsion	91	5.7. Tensile strength and torsional loading	91
5.7.1. Zugbeanspruchung	91	5.7.1. Tension	91
5.7.2. Torsionsbeanspruchung	92	5.7.2. Torsion	92
5.7.3. Literatur	93	5.7.3. Literature	93

## Inhaltsverzeichnis (Forts.)

## Content (cont.)

	Seite		Page
5.8. Verbundfestigkeit	94	5.8. Bond strength	94
5.8.1. Versuchsergebnisse	94	5.8.1. Test results	94
5.8.2. Literatur	97	5.8.2. Literature	97
5.9. Eigenschaften nach einer Temperatureinwirkung	98	5.9. Residual properties	98
5.9.1. Allgemeine Be- merkungen	98	5.9.1. General remarks	98
5.9.2. Restdruckfestigkeit	99	5.9.2. Residual com- pressive strength	99
5.9.3. Restverformungen nach der Abkühlung	102	5.9.3. Residual strains after cooling	103
5.9.4. Literatur	104	5.9.4. Literature	104
5.10. Abplatzungen	105	5.10. Spalling	105
5.10.1. Versuchsergebnisse	105	5.10.1. Test results	105
5.10.2. Literatur	107	5.10.2. Literature	107
6. Schlußbetrachtung	108	6. Conclusion	108

## Abkürzungen

### Abbreviations

$a_{th}$	- Temperaturleitfähigkeit in $m^2/s$ thermal diffusivity			compressive strength at temperature T or residual compressive strength after cooling to 20°C
$c_p$	- spezifische Wärmekapazität in $kJ/kg\ K$ heat capacity	$f_{t,20}$	- Zugfestigkeit bei 20°C in $N/mm^2$ original tensile strength at 20°C	
$c_{sp}$	- spezifisches Kriechmaß in $10^{-3}/N\ mm^{-2}$ specific creep proportion	$f_{t,T}$	- Zugfestigkeit bei der Temperatur T oder Restzugfestigkeit nach der Abkühlung in $N/mm^2$ tensile strength at temperature T or residual tensile strength after cooling to 20°C	
$d_e$	- Stahldurchmesser in mm steel bar diameter			
$E_{20}$	- Elastizitätsmodul bei 20°C in $N/mm^2$ modulus of elasticity at 20°C	HOZ	- Hochofenzement blast furnace slag cement	
$E_T$	- Elastizitätsmodul bei der Temperatur T in $N/mm^2$ modulus of elasticity at temperature T	$l_o$	- Verbundlänge in mm bond length	
$f_{b,20}$	- Verbundfestigkeit bei 20°C in $N/mm^2$ original bond strength at 20°C	Mix	- Gewichtsverhältnis; Zement: Zuschlag: Wasser ratio by weight; cement: aggregate: water	
$f_{b,T}$	- Verbundfestigkeit bei der Temperatur T und Restverbundfestigkeit nach der Abkühlung in $N/mm^2$ bond strength at temperature T or residual bond strength after cooling to 20°C	PZ	- Portlandzement portland cement	
$f_{c,20}$	- Druckfestigkeit bei 20°C in $N/mm^2$ original compressive strength at 20°C	T	- Temperatur in °C oder K temperature	
$f_{c,T}$	- Druckfestigkeit bei der Temperatur T oder Restdruckfestigkeit nach der Abkühlung in $N/mm^2$	$T_{cr}$	- kritische Betontemperatur in °C (Temperatur beim Bruch bei konstanter Aufheizung belasteter Betonproben) critical concrete temperature (temperature at failure under constant load during heating)	
		t	- Zeit in h oder d time	

$t_{BA}$	- Belastungsalter in d age at loading		ultimate strain at failure or stress maximum in a $\sigma$ - $\epsilon$ -diagram)
$t_T$	- Erwärmungsdauer vor Versuchs- beginn in d heating period before the test	$\Phi$	- Relaxation $\Phi = \sigma(t) / \sigma(t=0)$ relaxation
$\alpha$	- Beanspruchungsgrad $\alpha = \sigma / \sigma_{ult}$ stress level	$\lambda_{th}$	- Wärmeleitfähigkeit in W/m K thermal conductivity
$\epsilon$	- Verformung in ‰ strain	$\rho$	- Dichte in g/cm <sup>3</sup> oder kg/m <sup>3</sup> density
$\epsilon_{cr}$	- Kriechverformung in ‰ creep strain	$\sigma$	- Spannung in N/mm <sup>2</sup> actual stress
$\epsilon_{el}$	- elastische Verformung in ‰ elastic strain	$\sigma_{ult}$	- Bruchspannung (üblicherweise: $f_{c,20}$ ) ultimate stress (normally: $f_{c,20}$ )
$\epsilon_s$	- Schwinden in ‰ shrinkage	$\nu$	- Querdehnzahl Poisson's ratio
$\epsilon_{th}$	- thermische Verformung in ‰ thermal strain	$\nu_{cr}$	- Querkriechzahl beim mehr- axialen Kriechen Poisson's ratio for multi- axial creep
$\epsilon_{ult}$	- Bruchdehnung in ‰ (Verformung beim Spannungsmaximum in $\sigma$ - $\epsilon$ - Diagramm)		

## 1. Einleitung

### 1.1. Allgemeines

Der vorliegende Bericht entstand auf Veranlassung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Für die dafür zur Verfügung gestellten Mittel sei dem DAfStb herzlich gedankt. Soweit in dem Bericht eigene experimentelle Ergebnisse diskutiert sind, handelt es sich um Ergebnisse aus Arbeiten, die im Rahmen meiner Tätigkeit als Projektleiter im Sonderforschungsbereich 148 der DFG an der TU Braunschweig gewonnen wurden. Dem Sprecher des Sonderforschungsbereichs, Herrn Prof. K. Kordina, und allen in meinem Projekt B3 tätigen Mitarbeitern, insbesondere Herrn Dipl.-Phys. U. Diederichs, möchte ich hiermit Dank sagen für die stete Förderung und für die Ausführung der einzelnen Vorhaben. Ebenfalls bedanken muß ich mich bei verschiedenen Mitarbeitern im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, die jeweils zeitweise an der Durchführung der experimentellen Arbeiten beteiligt waren.

### 1.2. Problemstellung

Das thermische Verhalten von Beton wurde im Zuge der Entwicklung von Spannbeton-Druckbehältern für Kernkraftwerke und im Rahmen der Erforschung des Brandverhaltens von Stahlbetonbauteilen vielfach studiert. Über die Temperatureigenschaften von Beton liegen vor allem umfangreiche Untersuchungsergebnisse im Temperaturbereich von 20 bis 200° C vor, die im Zusammenhang mit der Reaktorforschung erarbeitet wurden. Der Temperaturbereich von 20 bis 1000° C wurde demgegenüber vorzugsweise unter dem Gesichtspunkt der Brandbeanspruchung von Stahlbetonkonstruktionen betrachtet. Trotzdem sind auch weiterhin die thermischen Eigenschaften von Normalbeton Gegenstand der Diskussion. Dies hat verschiedene Gründe; z.B. lassen sich die vorliegenden Daten und Fakten zum Teil nur schwer interpretieren, weil die

## 1. Introduction

### 1.1. General comment

This report was suggested by the Deutscher Ausschuss für Stahlbeton and the financial support of the DAfStb gratefully is acknowledged. As far as the report contains results of my own experimental investigations the work belongs to such results which were obtained during my work as a project leader in the Sonderforschungsbereich 148 of the DFG at the Technical University of Braunschweig. The leader of the Sonderforschungsbereich, Professor K. Kordina, and all my co-workers in the project B3, especially Dipl.-Phys. U. Diederichs, are involved in this report and their important contributions are thankfully emphasised in this context. Further I acknowledge contributions to the experimental work by different co-workers in the Institute of Baustoffe, Massivbau und Brandschutz - thank you all.

### 1.2. Objective

The thermal behaviour of concrete has been extensively studied in connection with the development of prestressed concrete pressure vessels for nuclear power plants and with the research on the behaviour of reinforced concrete members under fire conditions. For example, fairly comprehensive results on the properties of concrete in the temperature range from 20 - 200° C have been obtained within the context of reactor research, while the range from 20 - 1000° C has more particularly been studied from the viewpoint of reinforced concrete structures exposed to fire. Nevertheless the mechanical properties of concrete at high temperatures are still under consideration. This is due to the fact that many of the reported test results are hard to interpret as the



- untersuchten Materialien unterschiedlich,
- Versuchsbeschreibungen unvollständig,
- Prüfabläufe verschieden,
- Versuchsbedingungen nicht vergleichbar,
- Formen der Probekörper verschieden

- test materials are different,
- descriptions are incomplete,
- test procedures are different,
- test conditions are not comparable,
- shape of the test specimens are different.

sind. Die Untersuchungsergebnisse über die Temperatureigenschaften von Beton sind darüber hinaus über eine Vielzahl der verschiedenartigen Fachzeitschriften verstreut, so daß es schwierig ist, sich rasch einen Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zu verschaffen. In der vorliegenden Arbeit wird versucht, den Kenntnisstand über die Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen zusammenfassend darzustellen. Betrachtet wird der Temperaturbereich von  $20^{\circ}\text{C}$  bis zum Schmelzen des Betons bei etwa  $1350^{\circ}\text{C}$ . Der Schmelzvorgang von Beton wurde mit in die Betrachtung einbezogen, weil die fortgeschrittenen Sicherheitsbetrachtungen für bestimmte Reaktorkonfigurationen entsprechende Untersuchungen unumgänglich machen. Naturgemäß ist unser Kenntnisstand über Materialeigenschaften oberhalb  $1000^{\circ}\text{C}$  besonders gering.

Furthermore as the high temperature properties of concrete are concerned, the available research results are scattered throughout a large number of technical journals of all kinds, so that it is difficult quickly to obtain an overall view of the present state of knowledge on **this** matter. In this report it is endeavoured to give a summarizing review of the state of knowledge concerning the properties of concrete at high temperatures. More particularly the range from  $20^{\circ}\text{C}$  up to melting of concrete (at about  $1350^{\circ}\text{C}$ ) will be examined. This melting process has been included in this treatment of the subject because the advanced safety considerations relating to particular reactor configurations necessitate this approach. Not surprisingly, our knowledge of material properties above  $1000^{\circ}\text{C}$  is very limited.

In dem Bericht sollen zunächst die wichtigsten Eigenschaften von Beton, die zu untersuchen sind, identifiziert werden. Der gegenwärtige Kenntnisstand ist darzulegen und anhand der in der Literatur vorliegenden Daten auszuwerten. Weiterhin soll der Bericht dazu dienen, Aktivitäten auf noch nicht erforschten Gebieten anzuregen und das gesichtete Material zur Diskussion zu stellen.

The objectives of the report are to identify those relevant properties and characteristics of concrete which are necessary to study, survey the existing knowledge, evaluate the data and the appropriate literature, suggest activity in areas not already covered and provide facilities for the dissemination of information in papers and by discussion.

Im ersten Teil der Arbeit wird - überwiegend aufgrund eigener Forschungsarbeiten und -ergebnisse - die thermische Stabilität von Beton betrachtet. Behandelt werden Kristallumwandlungen, Rekristallisationsvorgänge und Abbaureaktionen infolge der Wasser- und  $\text{CO}_2$ -Freisetzung im Beton. Die bei den einzelnen Vorgängen auftretenden Wärmetönungen wurden soweit es möglich war quantitativ bestimmt und diskutiert. Anhand von Analogiebetrachtungen zur Glasgewinnung wird die Schmelzwärme von Beton ermittelt und mit Werten aus der Literatur verglichen.

In the first part of the report the thermal stability of concrete will be considered - mainly on the basis of the present authors' own research work and results. It deals with crystal transformations, recrystallization processes and degradation (dehydration) reactions due to the liberation of water and carbon dioxide in the concrete. The heat effects occurring in connection with the individual processes have been quantitatively determined as far as possible and are likewise discussed. With reference to analogy considerations relating to glass manufacture the heat of melting has been estimated and is compared with values published in the literature.

Im zweiten Teil der Arbeit sind die physikalischen Eigenschaften von Beton: Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähig-

keit, Temperaturleitzahl und thermische Dehnung, soweit diese aus der Literatur bekannt sind, zusammengestellt. Fehlende Daten wurden, soweit es möglich war, durch eigene Untersuchungen ergänzt, so daß der gesamte Temperaturbereich von 20 bis 1350°C erfaßt ist. Für einige wenige Fälle liegen überhaupt keine Meßwerte vor. Die entsprechenden Daten sind dann durch sorgfältige Extrapolationen und anhand von Analogiebetrachtungen abgeschätzt worden.

Im dritten Teil der Arbeit sind die wichtigsten Untersuchungsmethoden zur Erforschung des Temperaturverhaltens von Beton zusammengestellt. Da die mechanischen Eigenschaften von Beton häufig eng mit dem Versuchsablauf verknüpft sind, ist auch die Interpretation von Versuchsergebnissen sehr stark abhängig von der Art des jeweiligen Versuchs. Eine kurze Beschreibung von wichtigen Versuchsmethoden erschien deshalb vorteilhaft und notwendig.

Der vierte Teil der Arbeit behandelt die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Beton unter hoher Temperatur. Soweit erforderlich, wurden die Temperaturbereiche 20 - 200°C und 20 - 1000°C unterschieden. Mit Rücksicht auf das umfangreiche Datenmaterial und aus Gründen der Übersicht wurde die Darstellung teilweise auf die Form einer sichwortartigen Aufzählung reduziert. Das abschnittsweise gegliederte Schriftenverzeichnis erleichtert das Auffinden wichtiger Literaturstellen.

The second part of the report reviews the physical properties of concrete based on informations given in the relevant literature: density, specific thermal capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal expansion. Gaps in the available data have been filled as far as possible by the author's own investigations, so that in effect the entire temperature range from 20 - 1350°C is covered. In a few cases no measured data are available at all, and here the data in question have been estimated by means of careful extrapolations and with reference to analogy considerations.

The third part of the report reviews high temperature test methods employed in connection with concrete research. As mechanical properties of concrete are closely related to the specific test procedure the interpretation of test results depends a great deal on the type of the test. A brief description of important different test methods seemed to be an advantage and necessary.

The fourth part of the report deals with the main mechanical properties of concrete at high temperatures. As far as necessary the temperature areas from 20 to 250°C and 20 to 1000°C are distinguished. With respect to the extensive amount of data and for obtaining more clarity the presentation in this chapter is partly reduced to a number of summarizing statements. A list of references is related to each chapter which facilitates the search of important literature sources.

## 2. Abbaureaktionen im Beton bei hohen Temperaturen

### 2.1. Thermoanalytische Betonuntersuchungen

Bei einer thermischen Beanspruchung von hochofen- oder portlandzementgebundenen Betonen tritt bei mäßigen Temperaturerhöhungen eine ganze Reihe von Umwandlungen und Reaktionen der verschiedensten Art auf. Es handelt sich dabei, abgesehen von den vornehmlich in den Zuschlägen auftretenden Kristallumwandlungen, hauptsächlich um sogenannte Abbaureaktionen; d.h. diese Reaktionen bewirken einen sukzessiven Abbau der Betonstruktur. Die Abbaureaktionen laufen vorzugsweise im Zementstein, entsprechend der vorliegenden Gesteinsart aber auch im Betonzuschlag ab, wobei bei niedrigen Temperaturen Entwässerungs- und Dehydratationsreaktionen im Vordergrund stehen /2.7./. Bei höheren Temperaturen tritt in karbonatischen Zuschlägen die Entsäuerung des Kalksteins in den Vordergrund /2.8./. Oberhalb von 1200 bis 1300°C beginnen einige Komponenten des Betons zu schmelzen. Während des Schmelzens zeigen verschiedene Betonzuschläge, z.B. Ergußsteine wie Basalt, Entgasungs- und Bläherscheinungen, bei denen die während der Gesteinsbildung eingeschlossenen Gase frei werden. Oberhalb von 1300 bis 1400°C liegt der Beton als Schmelze vor.

Die während der Erwärmung des Betons einsetzenden Reaktionen lassen sich meßtechnisch mit Hilfe der Differential-Thermoanalyse (DTA) nachweisen. Bei diesem Meßverfahren werden eine Inertprobe (meist  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und die zu untersuchende Probe gleichzeitig in einem Ofen erhitzt und die durch Umwandlungsreaktionen zwischen den beiden Proben auftretenden Temperaturunterschiede registriert. Bild 2.1. zeigt solche Thermogramme für portlandzementgebundene Normalbetone mit quarzitisches, kalzitischen und basaltischen Zuschlägen /2.9./. Die Thermogramme wurden im Hinblick auf die in Abschnitt 2.2. und 2.3. diskutierten Reaktionswärmen erstellt, wobei pulverisierte Proben und übliche Einwaagemengen (ca. 100 mg) zur Anwendung ka-

## 2. Degradation reactions in concrete at high temperatures

### 2.1. Thermal analytical investigations on concrete

When concrete made with portland cement or with portland blastfurnace slag cement is subjected to heat, a number of transformations and reactions of many different kinds occurs already with only a moderate rise in temperature. Apart from the crystal transformations occurring mainly in the aggregates, these phenomena comprise the so called degradation reactions, these being reactions which bring about a progressive breakdown in the structure of the concrete. They occur more particularly in the hardened cement paste, but also (depending on the type of stone concerned) in the aggregates /2.7./. At low temperatures these reactions mainly take the form of dehydration and water expulsion reactions. At higher temperatures, decarbonation of carbonates will play a prominent part if the concrete contains limestone aggregates /2.8./. Above 1200°C and up to 1300°C some components of the concrete begin to melt. During melting, some aggregates (e.g., igneous rocks such as basalt) show degassing and expansion phenomena accompanied by release of gases trapped within the rock at the time of its formation. Above 1300°C-1400°C concrete exists in the form of a "melt", i.e., it has then turned into a liquid.

The reactions initiated during the heating of concrete can be studied with the aid of differential thermal analysis (DTA). In this method an inert sample (usually of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and the sample under investigation are heated simultaneously in a furnace, and the temperature difference - due to the transformation reactions - between the two specimens is recorded. Fig. 2.1 shows the so-called thermograms obtained in this way for normal concretes made with quartzitic, calcitic and basalt aggregates and with portland cement /2.9./. These curves were plotted in connection with the determination of the heat of reaction discussed in

men. Die DTA-Analysen zeigen deutlich die folgenden mit einer Wärmetönung verbundenen Reaktionsabläufe:

Entwässerung bei etwa  $100^{\circ}\text{C}$ ,  
Gelabbau (Dehydratation 1. Stufe) bei  $180^{\circ}\text{C}$ ,  
Portlandzersetzung bei  $500^{\circ}\text{C}$ ,  
Quarzumwandlung bei  $570^{\circ}\text{C}$ ,  
Zersetzung der CSH-Phasen ab  $700^{\circ}\text{C}$ ,  
Kalksteinsäuerung ab  $800^{\circ}\text{C}$ ,  
Beginn des Schmelzens ab  $1150\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ .

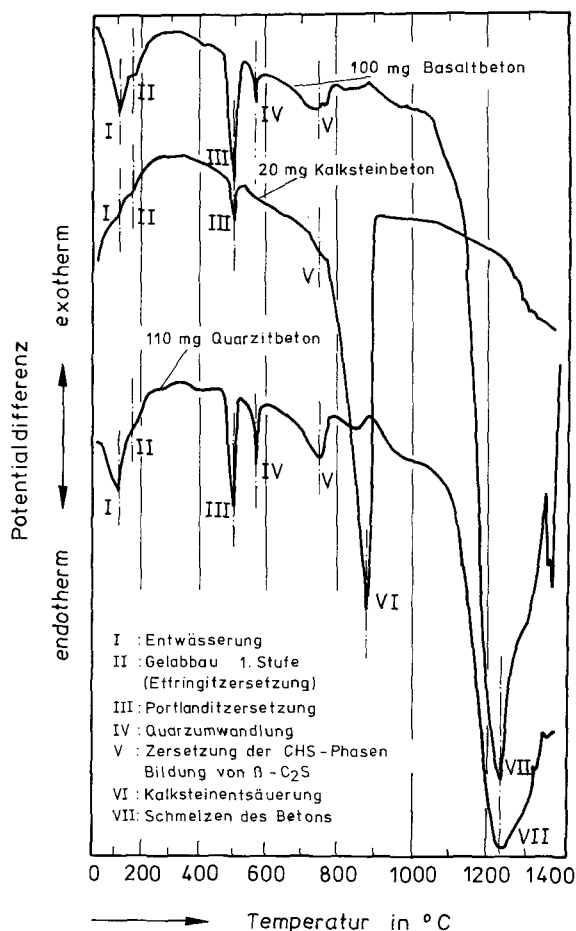


Bild 2.1 : Differentialthermoanalyse von verschiedenen Normalbetonen

Fig. 2.1 : Differential thermal analysis of various normalweight concretes

Quantitativ lassen sich vor allem solche Reaktionen verfolgen, die mit einem Massenumsatz, der sich in einer deutlichen Gewichtsänderung äußert, verbunden sind. Entsprechende Untersuchungen wurden mit Hilfe einer Groß-Thermowaage für Beton durchgeführt. Das Bild 2.2 zeigt die Meßergebnisse von solchen thermogravimetrischen Untersuchungen. Dargestellt ist auf der Y-Achse der Gewichtsverlust (bezogen auf die Einwaage) von drei portlandzementgebundenen Be-

Sections 2.2 and 2.3, for the purpose of which pulverized samples and commonly employed quantities (approx. 100 mg) were used. The DTA analyses clearly reveal the following reactions associated with heat effects:

water expulsion at about  $100^{\circ}\text{C}$ ;  
breakdown of gel (first stage of dehydration) at  $180^{\circ}\text{C}$ ;  
decomposition of portlandite at  $500^{\circ}\text{C}$ ;  
transformation of quartz at  $570^{\circ}\text{C}$ ;  
decomposition of the CSH phases from  $700^{\circ}\text{C}$  onwards;  
decarbonation of limestone from  $800^{\circ}\text{C}$  onwards;  
start of melting from  $1150^{\circ}\text{--}1200^{\circ}\text{C}$  onwards.

Quantitatively it is more particularly possible to study those reactions which are associated with a conversion of mass which manifests itself in a distinct change in weight. Investigations relating to this were carried out for concrete with the aid of a large thermo-balance. Fig.2.2 shows the results of the measurements performed in these thermogravimetric investigations. The ordinates in this diagram represent the loss of weight (referred to the initial weight of the sample for analysis) of three concretes, made with portland cement and with quartzitic, basalt and calcitic aggregates respectively, plotted against the temperature. The specimens employed in these tests were small concrete cylinders, 12 mm in diameter and 40 mm long, obtained as cores drilled from thick concrete slabs which had been stored at  $20^{\circ}\text{C}$  and 65 per cent relative humidity. The core specimens were stored under the same environmental conditions until immediately before the start of testing.

Fig.2.2 clearly shows that even already at temperatures below  $100^{\circ}\text{C}$  a loss of weight occurs in the concrete, which is due to the evaporation of water from the large pores. Just above  $100^{\circ}\text{C}$  the loss of weight from this cause proceeds at an increased rate. Up to about  $200^{\circ}\text{C}$  the slope of the curves is practically constant and practically independent of the pressure in the thermo-balance (35 mbar, atmospheric pressure). It is

tonen mit quarzitischen, basaltischen bzw. kalzitischen Zuschlägen über der Temperatur. Als Proben dienten kleine Betonzylinder ( $\varnothing$  12 mm, l = 40 mm), die durch Ausbohren aus dicken Betonscheiben gewonnen wurden. Die Bohrkern wurden ebenso wie zuvor die Betonscheiben bei 20° C und 65 Prozent rel. Feuchte bis unmittelbar vor Versuchsbeginn im Klimaraum gelagert.

Bild 2.2. zeigt deutlich, daß schon bei Temperaturen unterhalb von 100° C ein Gewichtsverlust im Beton auftritt, der dem Verdunsten von Wasser aus den Grobporen zuzuordnen ist. Knapp oberhalb von 100° C setzt dann verstärkt ein Gewichtsverlust durch Verdampfen des Grobporenwassers ein. Die Steigungen der Kurven verlaufen bis ca. 200° C nahezu konstant und sind nahezu unabhängig vom Druck in der Thermowaage (35 mbar Atmosphärendruck). Ein diskreter Siedepunkt ist anhand des Thermogrammes nicht auszumachen. Das resultiert einmal daraus, daß bei der gewählten Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/min ein Temperaturgradient in Richtung Probekörperachse den Siedepunkt verschmiert und daß zum anderen für jedes Volumenelement konstanter Temperatur aufgrund der unterschiedlichen Porengrößen ein ganzes Spektrum von Siedepunkten (je nach Porenradius entsprechend den Kapillarkräften) existiert. Des weiteren sind Stoff- und Wärmetransport gekoppelte Phänomene, so daß auch aufgrund der endlichen Wärmeleitfähigkeit des Betons im Versuch kein ausgeprägter Siedepunkt auftreten kann.

Oberhalb von 220° C verlaufen die Kurven dann etwas flacher. Bei diesen Temperaturen wird vor allem das Wasser aus den feineren Poren freigesetzt. Des weiteren wird auch schon chemisorbiertes Wasser resorbiert (Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe).

Die freigesetzten Wassermengen betragen bis 500° C etwa 2 bis 4 Gew.-Prozent ( $\hat{=}$  50 bis 100 l Wasser/m<sup>3</sup> Beton). Bei der Bewertung dieser Angabe ist zu beachten, daß die geprüften Betonproben bei 20° C und 65 Prozent rel. Feuchte gelagert wurden. Das Betonalter betrug jeweils mehr als 100 Tage. Selbstverständlich sind auch die Zementart und der Wasser/Zement-Wert bei solchen Untersuchungen zu berücksichtigen, worauf hier jedoch nicht weiter eingegangen werden kann.

not possible, with the aid of the thermogram, to detect a discrete boiling point. This is because, for one thing, at the chosen heating rate of 5 K/minute a temperature gradient in the direction of the axis of the test specimen blurs the boiling point and because, furthermore, there exists for each volume element of constant temperature a whole range of boiling points corresponding to the different pore sizes (more particularly corresponding to the capillary forces associated with the different values of pore radii). Besides, transport of matter and transport of heat are interlinked phenomena,

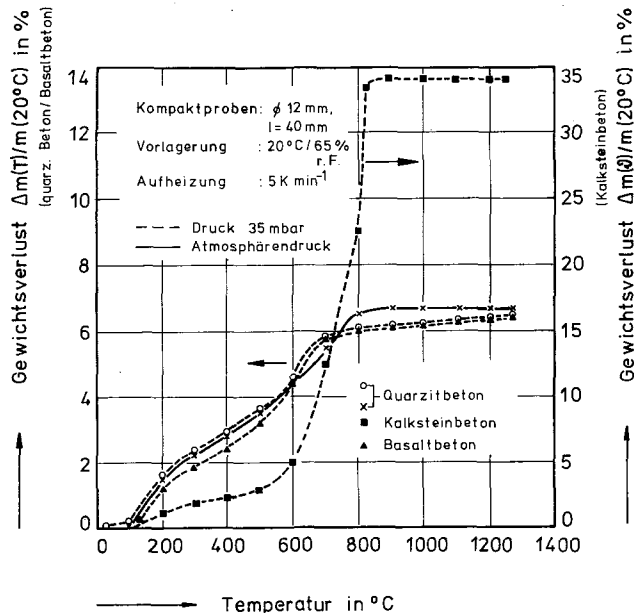


Bild 2.2 : Thermogramme von portlandzementgebundenen Normalbetonen

Fig. 2.2 : Thermograms of normalweight concretes made with portland cement

so that also on account of the finite thermal conductivity of concrete no definite pronounced boiling point can occur in the test.

Above 220° C the curves rise somewhat less steeply. At these temperatures the water more particularly from the finer pores is liberated. Furthermore, water held by chemisorption is then already also released (breakdown of the gel, first stage of dehydration).

The released amounts of water up to 500° C are equivalent to about 2-4 per cent by weight (corresponding to about 50-100 litres of water per m<sup>3</sup> of concrete). In jud-

Im Temperaturbereich von 500° C bis ca. 700° C nimmt der Gewichtsverlust noch einmal kräftig zu. Ursache dafür ist neben der Portlandzersetzung ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ) bei 450° C - 550° C, die Zersetzung der CSH-Phasen mit anschließender Bildung von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ . Beide Reaktionen sind mit einer Wasserabgabe verbunden. Sie liegt in der Größenordnung von 3 Gew.-Prozent ( $\hat{=}$  ca. 75 l Wasser/m<sup>3</sup> Beton). Neben den bisher diskutierten Phänomenen tritt bei einigen Betonzuschlägen (z.B. bei Serpentin) die Abgabe von zeolitisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser auf, die zugehörigen Entwässerungsreaktionen laufen je nach Bindungsstärke im Temperaturbereich von 120-600° C ab.

Betone mit Kalksteinzuschlägen zeigen bei Temperaturen oberhalb von 600° C einen zusätzlichen Gewichtsverlust. Ursache dafür ist die Kalksteinentsäuerung ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), bei der 44 Gew.-Prozent des  $\text{CaCO}_3$  als  $\text{CO}_2$  abgegeben werden können. Der gesamte Gewichtsverlust des hier untersuchten Kalksteinbetons beträgt entsprechend Bild 2.2 etwa 34 Gew.-Prozent, davon sind etwa 5 bis 6 Prozent auf die Wasserfreisetzung zurückzuführen.

Im Temperaturbereich von 900° C bis zum Einsetzen des Schmelzens bei ca. 1150-1200° C ist bei den untersuchten Proben kein meßbarer Gewichtsverlust mehr aufgetreten. Bei einigen Schmelzen ist jedoch ein Aufblähen der Betonzuschläge (z.B. Basalt), beobachtet worden. Die Bläherscheinungen wurden offenbar durch entweichende Gase hervorgerufen. Eine weitere wichtige Beobachtung ist, daß unabhängig vom Zuschlag bei allen drei Betonen die Zementsteinmatrix in jedem Fall in eine glasartige Phase übergeht. Weitere Erläuterungen sind in /2.9./ zu finden.

## 2.2. Bestimmung der Reaktionswärmen

Im Hinblick auf eine rechnerische Vorhersage des thermischen Verhaltens von massigen Bauteilen interessieren natürlich nicht nur die umgesetzten Massen, sondern auch die bei den einzelnen Reaktionen umgesetzten Wärmemengen. In der Tabelle 2.1. sind die im Beton ablaufenden Reaktionen mit den dazugehörigen Temperaturbereichen, den Reaktions- bzw. Umwandlungswärmen und

ging these data it should be considered that the concrete specimens which were tested in this research had been stored at 20° C and 65 per cent relative humidity. In each case the age of the concrete was more than 100 days. Obviously, the type of cement and the water-cement ratio must also be taken into consideration in such investigations, but these aspects will not be further examined here.

In the temperature range from 500° C to approximately 700° C the weight loss again shows a marked increase, this being due not only to the decomposition of portlandite ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ) at between 450° C and 550° C, but also to the decomposition of the CSH phases followed by formation of  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ . Both reactions are attended by release of water, approximately amounting to 3 per cent by weight (about 75 litres of water per m<sup>3</sup> of concrete). Besides the phenomena discussed above, with some aggregates (e.g., serpentine) there occurs the release of zeolithically bound water or water held by chemisorption; these dehydration reactions take place in the temperature range from 120° C - 600° C, depending on the bonding strength.

Concretes made with limestone aggregates show an additional loss of weight at temperatures above 600° C, this being due to the decarbonation reaction, i.e., the decomposition of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), in which 44 per cent by weight of  $\text{CaCO}_3$  can be given off as  $\text{CO}_2$ . The overall weight loss of the limestone concrete under investigation is 34 per cent according to fig. 2.2, of which 5-6 per cent is attributable to elimination of water.

In the temperature range from 900° C up to incipient melting at about 1150°-1200° C no measurable further loss of weight was found to occur in the specimens investigated. However, in some melts an expansion or bloating of the aggregates (e.g., basalt) was observed, these phenomena evidently being caused by escaping gases. Another important observation is that, irrespective of the aggregate, in all three concretes the matrix of hardened cement paste in any case undergoes conversion into a glassy phase. Further details may be found in /2.9./.

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion	Reaktions-/Umwandlungswärme [kJ/kg]	Reaktions-/Umwandlungswärme [MJ/m³ Beton]	umgesetzte Menge [kg/m³ Beton]
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser	Verdampfungswärme von Wasser: 2258	290	130 kg Wasser
30 - 300	Gelabbau: Dehydratation, 1. Stufe	Hydratationswärme: 250	< 20	< 78 kg Zementstein
120 - 600	Abgabe von chemisorbiertem bzw. zeolitisch gebundenem Wasser	Verdampfungswärme von Wasser: > 2258	> 135	60 kg Wasser
450 - 550	Zersetzung von Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	1000	< 40	< 40 kg CaO
570	Quarzumwandlung $\alpha \rightarrow \beta \text{ SiO}_2$	5.9	8,8 1,2	1500 kg Quarz 200 kg Quarz
600 - 700	Zersetzung der CSH-Phasen; Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$	Hydratationswärme: 500	< 120	< 240 kg Zementstein
600 - 900	nur Kalkstein: Entsäuerung von Kalkstein	Zersetzungswärme: 1637	2360	1600 kg Kalkstein $\text{CaCO}_3$ -Anteil ca. 90%
von 1100 - 1200	Schmelzen von Beton, Bildung glasartiger Substanzen	Schmelzwärme: 500 - 1000	quarzitisch: 1575 kalzitisch: 1125	2100 kg Beton 1500 kg Beton

Tabelle 2.1: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem und kalzitischem Beton

Table 2.1: Transformation and decomposition reactions of quartzitic and limestone concrete

den umgesetzten Massen nach unseren Erfahrungen zusammengestellt. Es wurde jeweils ein kalzitischer und ein quarzitischer Massenbeton mit Hochofenzement betrachtet. Der Mischungsaufbau des kalzitisches Reaktorbetons ist auf Tabelle 2.2. angegeben. Bei der Berechnung der Umwandlungswärmen und der umgesetzten Mengen für einen quarzitisches Beton wurde von einem Beton mit einem dem Kalksteinbeton analogen Mischungsaufbau ausgegangen. Es wurde weiter vorausgesetzt, daß es sich bei beiden Betonen um Massenbetone mit nahezu 100prozentiger Wassersättigung handelt /2.9./.

Im Bereich der Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser ist beim Massenbeton mit einer erheblichen Wasserfreisetzung zu rechnen. Es verdunsten zunächst aus den größeren Poren im oberflächennahen Bereich größere Mengen Wasser. Ab 100°C setzt dann verstärkt die Verdampfung des Wassers ein. Das Wasser wird dabei durch erhöhte Dampfdrücke (> 760 Torr) auch aus oberflächenferneren Bereichen vergleichsweise rasch ausgetrieben (Dampfströmung). Die Ausdampftrate kann bei rascher Aufheizung beträchtliche Werte annehmen. So wurden an

## 2.2. Determination of heat of reaction

With regard to the prediction, by calculation, of the thermal behaviour of massive concrete members not only the quantities of material involved in the reactions are of interest, but of course also the heat effects associated with the individual reactions occurring in the concrete, together with their temperature ranges, the heats of reaction or transformation, and the reacted quantities (as based on the present author's experience) are listed in table 2.1. A limestone and a quartzitic mass concrete made with blastfurnace slag cement were considered. The mix composition of the calcitic concrete is indicated in table 2.2. For calculating the heats of reaction and reacted quantities for the quartzitic concrete its mix composition was assumed to be similar to that of the calcitic concrete. It was further assumed that both materials under investigation were mass concretes almost 100 per cent saturated with water /2.9./. In the range of evaporation of physically bound water a considerable amount of water will be liberated of the mass concrete.

einem Massenbetonprobekörper (Gewicht ca. 11 Mg) Ausdampfzeiten von  $2,5 \text{ l/m}^2 \text{ h}$  gemessen (Temperaturanstiegsgeschwindigkeit ca.  $40^\circ\text{C/h}$  auf der heißen Betonoberfläche) /2.10./.

Stoff	Körnung	Gehalt
Zement:HOZ450L		350 kg/m <sup>3</sup>
Rheinsand	0- 2 mm	275 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Brechsand	0- 2 mm	375 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Splitt	2- 5 mm	300 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Splitt	8-11 mm	545 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Splitt	16-22 mm	375 kg/m <sup>3</sup>
EFA-Füller (RM)		50 kg/m <sup>3</sup>
Gesamtwasser		170 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittel: BV		4 cm <sup>3</sup> /kg Zement

Tabelle 2.2: Zusammensetzung eines normalen kalzitischen Betons

Table 2.2: Composition of a limestone concrete

Ab  $120^\circ\text{C}$  beginnt die Abgabe von in den kleineren Poren physikalisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser. Im Bereich von  $600^\circ\text{C}$  ist dieser Vorgang nahezu abgeschlossen. Aus eigenen Messungen ist bekannt, daß bis  $120^\circ\text{C}$  aus wassersattem Beton ca. 130 kg Wasser/m<sup>3</sup> ausgetrieben werden können. Im Bereich  $120\text{--}600^\circ\text{C}$  sind dann noch einmal 50-60 kg Wasser/m<sup>3</sup> Beton zu erwarten. Als Umwandlungswärme wurde näherungsweise die Verdampfungswärme von Wasser angenommen (was streng genommen nur für den Temperaturbereich unterhalb  $120^\circ\text{C}$  gilt, da z.B. für chemisorbiertes Wasser noch die Bindungsenergie zur Desorption zugeführt werden muß). Pro m<sup>3</sup> Beton ergeben sich damit Reaktionswärmen von ca. 290 MJ für die Entwässerung bis  $120^\circ\text{C}$  und ca. 135 MJ für die Entwässerung im Bereich  $120^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$ .

Im Temperaturbereich von  $30 - 300^\circ\text{C}$  findet parallel zur Entwässerung ein Abbau des Zementsteins statt (Dehydratation 1.Stufe). Das Maximum der Abbaurate liegt bei ca.  $180^\circ\text{C}$ . Bei der Berechnung der Umwandlungswärmen wurde davon ausgegangen, daß ca. 20 Prozent (näherungsweise der Anteil von  $\text{C}_2\text{S}$  im Zementstein) an diesen Abbaureaktionen beteiligt sind. Als Reaktionswärme wurde die Hydratationswärme von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  (ca. 250 kJ/kg) angenommen /2.13./. Für diese 1. Stufe des Gelabbaus müssen dem Beton somit ca.  $20 \text{ MJ/m}^3$  zugeführt werden.

First, substantial water evaporation occurs out of the larger pores close to the surface of the concrete. Then, from  $100^\circ\text{C}$  onwards, the evaporation will proceed at a faster rate, water being expelled as a result of above-atmospheric vapour pressure ( $> 760 \text{ Torr}$ ) from the parts near the surface (steam flow). This rate of vapour discharge from the concrete can become quite high if rapid heating-up is applied. Thus, discharge rates of  $2,5 \text{ litres/m}^2 \cdot \text{h}$  were measured on a mass concrete specimen weighing about 11 Mg (rate of temperature rise was approximately  $40^\circ\text{C}$  per hour at the hot surface) /2.10./.

At  $120^\circ\text{C}$  the expulsion of the water physically bound in the smaller pores, or held by chemisorption, commences; this continues up to about  $500^\circ\text{C}$ , at this temperature this process is virtually completed. From the author's own measurements it is known that up to  $120^\circ\text{C}$  about 130 kg of water per m<sup>3</sup> can be driven out of saturated concrete. In the range from  $120 - 600^\circ\text{C}$  the further release will be 50-60 kg of water per m<sup>3</sup> of concrete. The heat of transformation can be taken as approximately equal to the heat of evaporation of water (strictly speaking, this is correct only for temperatures below  $120^\circ\text{C}$ , because for the water bound by chemisorption it will additionally be necessary to supply the bond energy for achieving desorption). Thus, per m<sup>3</sup> of concrete, the heat of reaction is about 290 MJ for water expulsion up to  $120^\circ\text{C}$  and about 135 MJ for water expulsion in the temperature from  $120$  to  $600^\circ\text{C}$ .

From  $30 - 300^\circ\text{C}$ , along with the evaporation process, there occurs a dehydration of the hardened cement paste (first stage of dehydration). The maximum rate of dehydration occurs around  $180^\circ\text{C}$ . For calculating the heat of transformation it was presupposed that about 20 per cent (approximately the  $\text{C}_2\text{S}$  proportion in the hardened cement paste) participates in these degradation reactions. The heat of reaction was taken as equal to the heat of hydration of  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  (about 250 kJ/kg) /2.13./. For this first stage of breakdown of the gel about 20 MJ must be supplied per m<sup>3</sup> of concrete.



Im Temperaturbereich von 450-550°C tritt bei portlandzementgebundenen Betonen die Zersetzung des Portlandits auf ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ , Reaktionswärme ca. 1000 kJ/kg). Die Menge des sich bei der Hydratation des Betons bildenden Portlandits beträgt für einen Beton mittleren Zementgehalts etwa 40 kg. Bei Hochofenzementen (= 64 ÷ 15 Prozent Portlandzementklinker + 36 ÷ 85 Prozent Hüttensand, werkmäßig zusammen vermahlen) bildet sich nur aus den Klinkerphasen des Portlandzements  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , d.h., daß der Gehalt an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - bezogen auf die bei der Zersetzung anfallende Menge  $\text{CaO}$  - deutlich unter 40 kg/m<sup>3</sup> liegt. Die zugehörige Reaktionswärme von 40 MJ/m<sup>3</sup> gibt also nur einen oberen Grenzwert an.

Bei 570°C tritt die  $\alpha$ - $\beta$ -Quarzinversion auf. Diese Kristallumwandlung ist reversibel und endotherm. Sie ist mit einer Umwandlungswärme von 5,9 kJ/kg  $\text{SiO}_2$  verknüpft. Unter der Annahme, daß ca. 75 Prozent der zugesetzten quarzitischen Zuschläge an der Umwandlung beteiligt sind, ergeben sich Umwandlungswärmen von 8,8 MJ/m<sup>3</sup> für den quarzitischen und ca. 1,2 MJ/m<sup>3</sup> für den kalzitischen Beton.

Eine weitere Zersetzung des Zementsteins tritt zwischen 600-700°C auf (Zersetzung der CSH-Phasen und Bildung von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ). Da Hochofenzement durchschnittlich 60 Prozent  $\text{C}_3\text{S}$  enthält und die Hydratationswärme ca. 500 kJ/kg beträgt, ist mit einer Umsetzungswärme von ca. 120 MJ/m<sup>3</sup> Beton zu rechnen.

Um 780°C ist mit der Rekristallisation des unhydratisierten Hüttensandes zu rechnen. Selbst wenn man annimmt, daß der außerordentlich hohe Anteil von 100 kg Hüttensand nicht hydratisiert war, ergibt sich nur eine exotherme Reaktionswärme von 5 MJ/m<sup>3</sup>.

Im Temperaturbereich zwischen 600 und 900°C beginnt die Entsäuerung des Kalksteins ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Die Dissoziationswärme ist temperatur- und druckabhängig und beträgt bei 900°C und 1 bar ca. 1637 kJ/kg Kalkstein /2.6./]. Die Zersetzungsgeschwindigkeit und die Zersetzungstemperatur sind nicht nur stark temperatur- und druckabhängig, sondern sie werden auch vom Gehalt an  $\text{SiO}_2$ , das immer im Kalkstein vorhanden ist, beeinflusst. Bei einem Partialdruck des  $\text{CO}_2$  von 760 Torr kann die Zersetzungstemperatur

In the temperature range from 450°-550°C in concrete made with portland cement there occurs decomposition of portlandite, i.e.,  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ , with approximately 1000 kJ/kg heat of reaction. The quantity of portlandite which is formed as a result of the hydration of the cement in the concrete is about 40 kg/m<sup>3</sup> for concrete of medium cement content. With "Hochofen" cements (containing 15 to 64 per cent of portland cement clinker and 36 to 85 per cent of blastfurnace slag, interground in the works)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  is formed only from the portland cement ingredient, so that the content of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - referred to the amount of  $\text{CaO}$  formed on decomposition - is clearly below 40 kg/m<sup>3</sup>. The related heat of reaction of 40 MJ/m<sup>3</sup> must be taken to represent merely an upper limit.

At 570° C the  $\alpha$ - $\beta$  inversion of quartz takes place. This crystal transformation is reversible and endothermic, involving a heat of transformation of 5.9 kJ/kg of  $\text{SiO}_2$ . On the assumption that about 75 per cent of the quartzitic aggregate in the concrete participates in the transformation, the heat of transformation is found to be 8.8 MJ/m<sup>3</sup> for quartzitic and about 1.2 MJ/m<sup>3</sup> for calcitic concrete.

A further process of decomposition of the hardened cement paste takes place between 600 and 700° C (decomposition of the CSH phases and formation of  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ). Since the "Hochofen" cement contains 60 per cent  $\text{C}_3\text{S}$  on average, and since the heat of hydration is about 500 kJ/kg a heat of reaction of about 120 MJ/m<sup>3</sup> of concrete must be assumed. Around 780°C the unhydrated blastfurnace slag can be expected to undergo recrystallization. Even if it is assumed that a unusually high content of blastfurnace slag (100 kg) has not been hydrated, the exothermic heat of reaction is only 5 MJ/m<sup>3</sup>.

In the range between 600 and 900° C the limestone begins to undergo decarbonation ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). The heat of dissociation is dependent on temperature and pressure and is approximately 1637 kJ/kg of limestone at 900° C and 1 bar /2.6./. The rate of decomposition and the temperature at which it occurs are not only dependent to a great extent on temperature and pres-

den Bereich von 850°C (reiner Kalkstein) bis 560°C ( $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ ) überstreichen /2.6./. Für kalzitischen Beton ist insgesamt etwa mit einer Dissoziationswärme von 2360 MJ/m<sup>3</sup> zu rechnen. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Kalkstein zu ca. 90 Prozent aus  $\text{CaCO}_3$  besteht. Es entstehen dabei ca. 630 kg  $\text{CO}_2$ , die bei 900°C und 760 Torr ein Volumen von 1400 m<sup>3</sup> einnehmen!

### 2.3. Ablation, Schmelzwärme und Erosion in Beton

Ab ca. 1150-1200°C beginnen, wie in Abschnitt 2.1 bereits gezeigt, einige Bestandteile des Betons zu schmelzen. Über den Schmelzvorgang selbst und die dabei entstehenden Phasen ist in der Literatur nur wenig bekannt. Es scheint aufgrund der berichteten Fälle jedoch festzustehen, daß die Verflüssigung des Betons mit dem Aufschmelzen der Zementsteinmatrix beginnt und erst im Anschluß daran die Zuschlaggesteine schmelzen /2.2., 2.4., 2.12./.

Reiner dehydratisierter Zementstein, der chemisch gesehen die Hauptbestandteile - Kalk (63-71 Prozent); Kieselsäure (18 ÷ 30 Prozent), Tonerde + Eisenoxid (5÷15 Prozent) - enthält, beginnt etwa um 1200° C /2.3./ zu schmelzen. Der Schmelzpunkt hängt wesentlich von den Gehalten an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ab. So kann beispielsweise bei Eisenoxidgehalten über 7 Prozent die Schmelztemperatur unter 1200° C sinken. Ebenso werden bei der Reaktion des Kalks (CaO) mit  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalten von 15÷35 Prozent im Dreiphasensystem zwei eutektische Gebiete mit Schmelzpunkten bei 1170° C und 1265° C durchlaufen /2.6./. Weitere Elemente und Verbindungen, die in Spuren immer in den Klinkermineralien vorhanden sind, erniedrigen den Schmelzpunkt weiter, so daß mit dem Auftreten erster Schmelzinseln bei Temperaturen um 1100° C zu rechnen ist.

Die Schmelzpunkte der Zuschlaggesteine variieren stark (vgl. Tabelle 4 in/2.9./). Basalt liegt mit einem Schmelzpunkt von 1060°C an der unteren Grenze aller Gesteine, während Quarzit erst ab ca. 1700° C schmilzt (Christobalit → Schmelze bei  $1713 \pm 5^\circ \text{C}$ ). Der Quarzit erfährt jedoch bei seiner Erwärmung eine Reihe von Umwandlungen. Der Tieftempe-

sure, but are also affected by the content of  $\text{SiO}_2$ , which is always present in limestone. At a partial  $\text{CO}_2$  pressure of 760 Torr the decomposition temperature may be anywhere within the range from 850° C (for pure calcium carbonate limestone) to 560°C ( $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ ) /2.6./. For calcitic concrete the total heat of dissociation can be put at about 2360 MJ/m<sup>3</sup>, on the assumption that about 90 per cent of the limestone consists of  $\text{CaCO}_3$ . This gives rise to the formation of about 630 kg of carbon dioxide which occupies a volume of 1400 m<sup>3</sup> at 900° C and 760 Torr!

### 2.3. Ablation, heat of melting and erosion of concrete

As already stated in Section 2.1, some constituents of concrete begin to melt already from a temperature of about 1150 -1200° C onwards. Little information on the actual process itself and the phases that are formed in connection with it is to be found in the literature. From such observations as have been reported however, it would appear that the liquefaction of the concrete commences with the melting of the matrix of hardened cement paste and that melting of the aggregates takes place only after this /2.2., 2.4., 2.12./.

A hardened paste of "neat" cement - whose main chemical constituents are lime (63-71 per cent), silica (18-30 per cent), and alumina + iron oxide (5-15 per cent) - begins to melt at about 1200° C /2.3./. The melting point depends substantially upon the content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . For example, if the iron oxide content is about 7 per cent, the melting temperature may fall below 1200° C. Similarly, in the reaction of lime (CaO) with silica ( $\text{SiO}_2$ ) and alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents from 15 to 35 per cent two eutectic fields with melting points at 1170 and 1265° C are traversed in the ternary system /2.6./. Other elements and compounds which are always present in traces in the clinker minerals lower the melting point still further, so that the occurrence of the first melting areas can be expected at about 1100° C.

raturquarz ( $\alpha$ -Quartz) des Gesteins wandelt sich beim Überschreiten von  $575^{\circ}\text{C}$  spontan in die  $\beta$ -Quarzmodifikation um (vgl. Bild 1). Bei Temperaturen zwischen  $1000$  und  $1200^{\circ}\text{C}$  verändert sich der  $\beta$ -Quarz langsam (irreversibel) unter völliger Strukturzerstörung in eine feinkristalline Masse der kubischen  $\text{SiO}_2$ -Modifikation  $\alpha$ -Christobalit. Zwischen ca.  $1300$  und  $1470^{\circ}\text{C}$  wandelt sich der Christobalit unter dem Einfluß der Beimengungen (besonders von Alkalien und Erdalkalien) in  $\alpha$ -Tridymit um. Bei  $1470^{\circ}\text{C}$  erfolgt eine langsame Rückbildung in den stabilen  $\alpha$ -Christobalit und ab  $1700^{\circ}\text{C}$  erfolgt dann die Schmelzung.

Bei Vorhandensein von Schmelzinseln des dehydratisierten Zementsteins kann jedoch schon aufgrund der Zusammensetzung der Schmelzen in den Kontaktzonen ein Abschmelzen der quarzitisches Zuschläge bei niedrigen Temperaturen erfolgen. Bei Zusatz von 1 Prozent  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wird die Übergangstemperatur Quarz  $\rightarrow \text{SiO}_2$ -Glas auf  $1315^{\circ}\text{C}$  gesenkt. Ebenso beschleunigen  $\text{CaO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  und  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  das Entstehen der glasigen Phase. Kalzitische Zuschläge zersetzen sich im Temperaturbereich von  $600$ – $900^{\circ}\text{C}$  (vgl. Tab. 2.1.) Das sich bildende  $\text{CaO}$  hat in reiner Form den außerordentlich hohen Schmelzpunkt von  $2570^{\circ}\text{C}$ . Bei Vorhandensein von Eisenoxid und Kieselsäure (aus den Feinzuschlägen, dem Zement bzw.  $\text{CaO}$ -Verunreinigungen) wird der Schmelzpunkt u.U. jedoch durch die Bildung verschiedener Kalziumsilikate bzw. Kalkferrite auf Temperaturen unter  $1400^{\circ}\text{C}$  abgesenkt.

Die für den Übergang Beton  $\rightarrow$  Betonschmelze aufzubringende latente Wärme wird in der Literatur /2.2., 2.4., 2.12./ manchmal als Schmelzwärme bezeichnet. In Wirklichkeit läuft aber gerade in dem Temperaturbereich, in dem das Schmelzen beobachtet wird, eine ganze Reihe von Reaktionen ab, die wiederum selbst mit Umwandlungswärmen verbunden sind, wobei die Umwandlungswärmen u.U. weit höher sein können als die eigentliche Schmelzwärme. Der Wärmehaushalt während des Schmelzens von Beton wurde dahingehend bislang überhaupt noch nicht untersucht.

Hildenbrand und Mitarbeiter /2.2./ geben als "Schmelzwärme" für silikatischen Beton  $204\text{ kJ/kg}$  an, ein Wert, der dem Schmelzen von

The melting points of the aggregates vary greatly (see table 4 in /2.9/). With  $1060^{\circ}\text{C}$  basalt is at the lower limit of all types of rock in this respect, whereas quartzite does not melt below about  $1700^{\circ}\text{C}$  (cristobalite begins to produce a melt at  $1713^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ). The low-temperature quartz ( $\alpha$ -quartz) in this rock spontaneously undergoes conversion into the  $\beta$ -quartz modification at temperatures above  $575^{\circ}\text{C}$  (see Fig. 2.2). At temperatures between  $1000$  and  $1200^{\circ}\text{C}$  the  $\beta$ -quartz slowly (and irreversibly) changes - in conjunction with complete breakdown of its structure - into  $\alpha$ -cristobalite, the cubic  $\text{SiO}_2$  modification. Then, between about  $1300$  and  $1470^{\circ}\text{C}$ , this substance in turn is transformed, under the influence of the impurities that are present (more particularly: alkalies and alkaline earths), into  $\alpha$ -tridymite. At  $1470^{\circ}\text{C}$  there occurs gradual re-formation of stable  $\alpha$ -cristobalite, and from  $1700^{\circ}\text{C}$  onwards the material undergoes melting.

If small islands of melting areas of dehydrated hardened cement paste are present, however, incipient melting of the quartzitic aggregates may occur at lower temperatures by virtue of the composition of the melts in the contact zones. If 1 per cent  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is added, the transition temperature for "quartz  $\rightarrow \text{SiO}_2$  glass" is lowered to  $1315^{\circ}\text{C}$ . Similarly, the formation of the vitreous phase is accelerated also by  $\text{CaO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Calcitic aggregates are decomposed in the temperature range between  $600^{\circ}$  and  $900^{\circ}\text{C}$  (see Table 2.1). The  $\text{CaO}$  that is formed has, in its pure state, the exceedingly high melting point of  $2570^{\circ}\text{C}$ . If iron oxide and silica (from the fine aggregates, the cement and/or the  $\text{CaO}$  impurities) are present, the melting point may under certain circumstances be lowered to below  $1400^{\circ}\text{C}$  as a result of the formation of various calcium silicates or ferrites, however.

The latent heat to be supplied for the transition of concrete from a "solid" to a "melt" is sometimes called the heat of melting in the literature /2.2., 2.4., 2.12./. In reality, however, a whole series of reactions take place particularly in the range

Quarz (237 kJ/kg) recht nahekommt. Muir /2.4./ und Tze/2.12./ geben eine "effective latent heat", das ist die Summe aller Dehydratations- und sonstiger Umwandlungswärmen einschließlich der Schmelz- und Lösungswärmen von 2560-3600 kJ/kg an. Zieht man davon die gesamte Dehydratationswärme ab (sie beträgt nach Hildenbrand et al. /2.2./ 445 kJ/kg bzw. nach eigenen Messungen 263 kJ/kg), so dürfte die "effektive Schmelzwärme" des Betons zwischen 2000 und 3000 kJ/kg liegen! Unter "effektiver Schmelzwärme" ist dabei die gesamte latente Wärme zu verstehen, die dazu benötigt wird, um den dehydratisierten und (bei Betonen mit kalzitischen Zuschlägen) dekarbonatisierten Beton am Schmelzpunkt vom festen in den flüssigen Zustand zu überführen.

Für kalzitischen Beton geben Muir /2.4./ und Tze/2.12./ ebenfalls eine "effective latent heat" von 2560-3600 kJ/kg an. Nach Abzug der Dehydratations- und Dekarbonatisierungswärmen ergäbe das "effektive Schmelzwärmen" von 1300 bis 2300 kJ/kg. Hildenbrand et al. /2.2./ stellen beim Schmelzen von kalzitischem Beton eine exotherme Reaktion fest, die sie der Bildung von Kalziumsilikaten zuordnen. Als Reaktions- und Schmelzwärme finden sie - 1100 kJ/kg! Die Verfasser von /2.9./ kommen aufgrund von Analogiebetrachtungen zur Glas- und Zementherstellung zu dem Schluß, daß die "effektive Schmelzwärme" von Beton, und zwar sowohl des kalzitischen als auch des quarzitischen Betons, in der Größenordnung 500-1000 kJ/kg dehydratisiertem und dekarbonatisiertem Beton liegt.

Im Zusammenhang mit dem hypothetischen Katastrophenfall Kernschmelzen interessiert vor allem die Frage, welche Energie der Beton als Umfassungsbauteil maximal dissipieren kann. Aus der Raumfahrt wurde dazu der Begriff "heat of ablation" entlehnt. Die Ablationswärme ist dabei als die einfallende Wärme, die während eines stationären Erosionsprozesses von der Masseneinheit des Stoffes dissipiert wird und zur Abtragung dieser Masseneinheit führt, definiert. Sie setzt sich aus der aufzubringenden fühlbaren Wärme und den Reaktions- und Umwandlungswärmen zusammen. Nach Muir /2.4./ beträgt die Ablationswärme für Beton  $6 \pm 3$  MJ/kg. Sie ist für einfallende Wärmeströme

of temperatures in which the melting is observed, and these reactions are themselves in turn bound up with heats of transformation, which can sometimes be much greater than the actual heat of melting. The thermal process during the melting of concrete has hitherto not been investigated at all from this point of view.

Hildenbrand and co-workers /2.2./ give the "heat of melting" of silicatic concrete as 204 kJ/kg, a value which is very close to that for quartz (237 kJ/kg). Muir /2.4./ and Tze/2.12./ indicate an "effective latent heat", i.e., the sum of all the dehydration and other heats of transformation, including those of melting and solution of 2560-3600 kJ/kg. On deducting from this figure the entire heat of dehydration (which amounts to 445 kJ/kg according to Hildenbrand et al. /2.2./ and to 263 kJ/kg according to the present author's own measurements), the "effective heat of melting" of concrete would presumably be between 2000 and 3000 kJ/kg! By "effective heat of melting" is to be understood the total latent heat which is needed for transforming the dehydrated and (with calcitic aggregates) decarbonated concrete from the solid to the liquid state at the melting point.

For calcitic concrete Muir /2.4./ and Tze /2.12./ likewise state the "effective latent heat" to be between 2560 and 3600 kJ/kg. On deducting the heats of dehydration and decarbonation, this would result in an "effective heat of melting" of 1300 to 2300 kJ/kg. Hildenbrand et al. /2.2./ observed the occurrence of an exothermic reaction in connection with the melting of calcitic concrete and attributed it to the formation of calcium silicates. They ascertained the heat of reaction and melting as - 1100 kJ/kg! On the basis of considerations of analogy between glass manufacture and cement manufacture authors of /2.9./ have come to the conclusion that the "effective heat of melting" of concrete - calcitic as well as quartzitic - is of the order of magnitude of 500-1000 kJ/kg of dehydrated and decarbonated concrete.

von 20-200 W/cm<sup>2</sup> unabhängig von der Art der Zuschläge (Basaltzuschlag, Kalksteinzuschlag). Nach Tze /2.12./ ergibt sich für die fühlbare Wärme (1,09 kJ/kg°C · 1330° C) = 1450 kJ/kg und entsprechend für die Ablationswärme 1450 + 2560 ÷ 3600 ≈ 4050 ÷ 5050 kJ/kg. Die Wärmen von Hildenbrand et al. /2.2./ als "integrale Schmelzenthalpien" berechnet, liegen mit 2227 kJ/kg für silikatischen Beton und mit 1474 kJ/kg für kalzitischen Beton an der unteren Grenze der in der Literatur bekannt gewordenen Werte. Nach neueren Ergebnissen dürften für eine quasistationäre Ablation des Betons 3200 kJ/kg für kalzitischen und 2400 kJ/kg für quarzitischen Beton realistische Werte sein /2.9./.

Bei einer direkten Einwirkung einer Metallschmelze auf Beton können sich über die hier diskutierten Phänomene hinaus noch wesentliche Veränderungen in den Schmelztemperaturen und Schmelzenthalpien ergeben, da zumindest einige Bestandteile des Betons sehr heftig mit der Metallschmelze reagieren.

Betonart	Erosionsrate	Versuchsart	Forscher
Basalt Kalkstein	20 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	Thermitreaktion	H.J. Sutherland
Quarzit	40 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	Thermitreaktion	D.Perinic
Basalt ----- Kalkstein	22 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ----- 35 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	Metallschmelz + Lichtbogenheizung	G. Hildenbrand, M. Peehs
Basalt Kalkstein	12 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	Plasmastrahl	J.F. Muir
Kalkstein ----- Quarzit	66 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ----- 44 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	getaucht in eine ----- Stahlschmelze	C. Ehm, U.Schneider
Quarzit	25 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	Thermitreaktion	

Tabelle 2.3 : Erosionsraten verschiedener Betone

Table 2.3 : Erosion rates of different concretes

In connection with the accidental situation of core melting it is of special interest to know how much energy can be dissipated by the concrete of the containment structure. The term "heat of ablation" is applied in this context, being adopted from aerospace industry, more particularly in connection with spacecraft re-entry into the atmosphere. The heat of ablation is defined as the heat which is dissipated per unit mass of the material during a steady-state erosion process resulting in the removal of this unit mass. It is composed of the sensible heat to be provided and of the heats of reaction and transformation. According to Muir /2.4./ the heat of ablation for concrete is 6 ± 3 MJ/kg. For an incoming heat flow of 20-200 W/cm<sup>2</sup> it is independent of the nature of aggregates (basalt, limestone). As reported by Tze/2.12./ the sensible heat is 1.09 kJ/kg °C x 1330°C = 1450 kJ/kg; correspondingly, for the heat of ablation he gives 1450 + 2560 to 3600, i.e., a range of approximately 4050 to 5050 kJ/kg. The heats which Hildenbrand et al. /2.2./ calculate as "integral melting enthalpies" are 2227 kJ/kg for silicatic concrete and 1474 kJ/kg for calcitic concrete, these values being at the lower limit of those reported in the literature. According to recent results, realistic values for the heat of ablation are 3200 kJ/kg and 2400 kJ/kg for calcitic and for quartzitic concrete respectively /2.9./.

In a case where concrete is subjected to the direct action of molten metal, there may, in addition to the phenomena discussed here, occur substantial changes in the melting temperatures and melting enthalpies, because at least some constituents of concrete react very violently with molten metal. The most familiar phenomenon is the decomposition of the water in the concrete. Experimental research for ascertaining and explaining the phenomena involved is being carried out by different laboratories. The degradation of a concrete surface by liquid metal attack in this context is generally called erosion. Therefore the erosion rate can also be defined as the rate of penetration of molten metal into a concrete structure. Table 2.3. shows results from recent

Das bekannteste Phänomen ist die Zersetzung des Betonwassers. Experimentelle Untersuchungen zur Erfassung und Erklärung der auftretenden Phänomene werden gegenwärtig bei verschiedenen Institutionen durchgeführt. Die Abtragung der Betonoberfläche bei Beanspruchung durch flüssiges Metall wird dabei allgemein als Erosion bezeichnet. Unter Erosionsrate versteht man somit einen Prozeß der kontinuierlichen Abtragung von Beton durch eine Metallschmelze. Auf Tabelle 2.3 sind bisher bekannt gewordene Erosionsraten angegeben, wobei in den Versuchen jeweils Abschmelztemperaturen von 1600° C (Stahlschmelze) und 2600° C (Thermitreaktion) zur Anwendung kamen. In den einzelnen Daten gibt es naturgemäß große Unterschiede, weil verschiedene Betone untersucht wurden und den einzelnen Werten sehr unterschiedliche Prüfbedingungen zugrunde liegen /2.1./.

investigations, whereby temperatures from 1600° C (molten steel) to 2600° C (metallic-thermic reaction) were employed. There is a wide scatter in the data because of different mixtures of concrete and different test conditions /2.1./.

#### 2.4. Literatur

#### Literature

- |  |  |
|--|--|
| <p>/2.1./ Ehm, C.; Schneider, U.: Verhalten von Beton unter Einwirkung flüssiger Metalle (Behaviour of concrete under liquid metal attack). Forschungsbericht, Inst.für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Techn. University of Braunschweig, 1981 (unpublished).</p> <p>/2.2./ Hildenbrand, G. et al.: Untersuchung der Wechselwirkung von Kernschmelze und Reaktorbeton. Abschlußbericht - Förderungsvorhaben BMFT RS 154, KWU, Erlangen, Mai 1978, s.a. Peehs, M., Skokan, A.; Reimann, M.: Investigations in Germany of the Barrier Effect of Reactor Concrete against Propagating Molten Corium in the Case of a Hypothetical Core Meltdown Accident of a LWR, ENS/ANS Int. Top. Meeting on Nuclear Power Reactor Safety, Brüssel, 16.-19.10.78, Vol.1.</p> <p>/2.3./ Kühl, H.: Zementchemie (Chemistry of Cement). VEB-Verlag Technik, Berlin 1958.</p> | <p>/2.4./ Muir, J.F.: Response of concrete exposed to a high heat flux on surface. Research Paper SAND 77-1467, Sandia Laboratories, Albuquerque NM, USA 1977.</p> <p>/2.5./ Perinic, D. et al.: Betontiegelversuche mit Thermitschmelzen (Concrete tests with metallo-thermic reactions). Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2572, Juli 1979.</p> <p>/2.6./ Schiele, E., u.L.W. Berens: Kalk - Herstellung - Eigenschaften - Verwendung (Lime - Production - Properties - Application). Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1972.</p> <p>/2.7./ Schneider, U.; Diederichs, U.; Rosenberg, W.; Weiß, R.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton (High temperature behaviour of concrete). Sonderforschungsbereich 148, Arbeitsbericht 1978/80, Teil II, B3-1/142, Technical University of Braunschweig, 1980.</p> |
|--|--|

- /2.8./ Schneider, U.; Diederichs, U., u. Weiß, R.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton (High temperature behaviour of concrete). Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen, Arbeitsbericht 1975/77, Teil II, B3-1/95, Technical University of Braunschweig, 1977.
- /2.9./ Schneider, U.; Diederichs, U.: Physical properties of concrete from 20° C up to melting. Part 1 and 2, Betonwerk + Fertigteiltechnik, H. 3 u.4, S.141-149 u. 223-230, 1981.
- /2.10./ Schneider, U.; Kordina, K.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Konstruktionsbetons 2.3 für den SNR-Kalkar (Determination of the heat conductivity of reactor concrete for SNR-Kalkar). Untersuchungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1976 (unveröffentlicht).
- /2.11./ Sutherland, H.J.: Acoustic measurement of the penetration of a molten metallic pool into concrete. Nuc. Tech. 46, ISO-355, Dec. 1979.
- /2.12./ Tze Yao Chu: Radiant heat evolution of concrete - a study of the erosion of concrete due to surface heating. Research Paper SAND 77-0922, Sandia Laboratories, Albuquerque NM, USA, 1978.
- /2.13./ Zement Taschenbuch 1974/75 (Cement Handbook 1974/75). Verein Deutscher Zementwerke, Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1974.

### 3. Physikalische Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen

#### 3.1. Allgemeines

Im folgenden sind die wesentlichen physikalischen Eigenschaften von verschiedenen Normalbetonen für den Temperaturbereich von 20° C bis zur Schmelztemperatur (ca. 1350° C) zusammengestellt:

Dichte  $\rho$   $[\text{Mg/m}^3 \hat{=} \text{g/cm}^3]$  ;  
 mittlere spezifische Wärmekapazität  $c_p$   $[\text{kJ/kgK}]$  ;  
 Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$   $[\text{W/mK}]$  ;  
 Temperaturleitfähigkeit  $a$   $[\text{m}^2/\text{s}]$  ;  
 thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$   $[\text{‰}]$  ;  
 Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$   $[10^{-6}/^\circ\text{C}]$  .

### 3. Physical properties of concrete at high temperatures

#### 3.1. General

This section deals with the principal physical properties of various normal weight concretes. For the range from 20° C up to melting (at about 1350° C) the following characteristics of the material have been studied and will be discussed here:

density  $\rho$   $[\text{Mg/m}^3 \text{ or } \text{g/cm}^3]$  ;  
 mean heat capacity  $c_p$   $[\text{kJ/kgK}]$  ;  
 thermal conductivity  $\lambda$   $[\text{W/mK}]$  ;  
 thermal diffusivity  $a$   $[\text{m}^2/\text{s}]$  ;  
 thermal expansion  $\epsilon_{th}$   $[\text{‰}]$  ;  
 coefficient of thermal expansion  $\alpha_T$   $[10^{-6}/\text{K}]$  .

Bekanntlich hängen die physikalischen Eigenschaften eines Betons, abgesehen von den Zuschlägen, dem Zement und dem Wasser/Zement-Wert, ganz wesentlich von den Herstellungs-, Verarbeitungs- und Hydratationsbedingungen bzw. der Nachbehandlungsart und von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit usw.) sowie von der Bauteilgeometrie ab. Naturgemäß ist daher im unteren Temperaturbereich, in dem das Betonwasser eine wichtige Rolle spielt, mit besonders großen Streuungen bei den physikalischen Kennwerten zu rechnen. Ausgewertet wurden in dieser Arbeit eigene Daten sowie Literaturwerte, die uns zuverlässig erschienen und für deren Streuungen überwiegend betonspezifische Gründe vorzuliegen scheinen /2.9./.

### 3.2 Dichte

Die Dichte verschiedener Betone ändert sich je nach Zuschlagsdichte und Feuchtigkeitsgehalt im Temperaturbereich 20-150°C mehr oder minder stark, wobei die Lagerungsbedingungen einen besonders starken Einfluß haben. So ändert der wassergelagerte Kalksteinbeton nach Bild 3.1. im Temperaturbereich 20-150°C seine Dichte um nahezu 0,1 g/cm<sup>3</sup>. Dagegen zeigte sich, daß bei 20°C/65 Prozent r.F. klimatisierte Proben bei der anschließenden Erwärmung im Temperaturbereich 20-150°C nur vergleichsweise wenig Wasser abgeben und sich somit die Be-

As is well known, the physical properties of concrete will - apart from the aggregates, cement and water-cement ratio - depend to a great extent on the manner of making and working the concrete, its hydration conditions and (in connection with these) the manner of curing and the ambient conditions to which it is exposed (temperature, humidity, etc.), as well as the geometric features of the concrete member or structural component concerned. Of course, at the lower end of the temperature range, where the water in the concrete plays an important part, very large variations in the physical characteristics values must be expected. In the present publication the author has evaluated his own data as well as those published in the literature which appeared reliable and in which the variation appeared attributable mainly to factors specific to concrete /2.9./.

### 3.2. Density

The density of various concretes depends on the density of their aggregates and their moisture content in the temperature range between 20 and 150°C. The changes in density that occur within this range are very greatly affected by the conditions of storage. Thus, the water-stored limestone concrete (see fig. 3.1) was found to undergo a change in density of about 0.1 g/m<sup>3</sup> in the range from 20 -150°C. On the other hand, specimens of concrete previously stored at 20°C and 65 per cent relative humidity were found, when heated from 20° - 150°C, to give off only relatively little water and therefore to undergo little change in density. Harmathy /3.12./ appears to have used almost dry concrete for his density determination. The limestone concrete of Hildenbrand et al. /2.2./ is in the medium moisture range. At temperatures from 150°C up to the start of limestone decarbonation (at 600°C) there is only a very minor decrease in the density of limestone concrete.

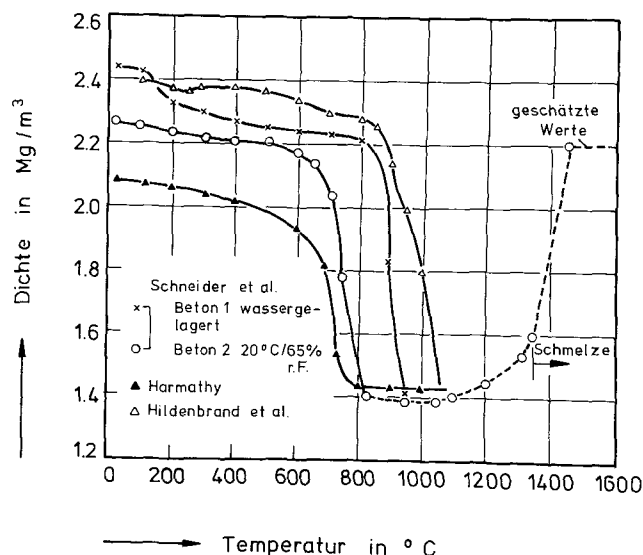


Bild 3.1 : Dichte von Kalksteinbetonen

Fig. 3.1 : Density of limestone concretes

Depending on the composition of limestone and on the prevailing conditions of heating, decarbonation of the limestone in the concrete commences between 600 and 900°C,



tondichte auch wenig ändert. Harmathy /3.12./ scheint zur Dichtebestimmung einen nahezu trockenen Beton benutzt zu haben. Der Kalksteinbeton von Hildenbrand et al. /2.2./ liegt im mittleren Feuchtigkeitsbereich. Im Bereich von 150° C bis zum Einsatz der Kalksteinentsäuerung (600°C) fällt die Dichte von Beton nur recht geringfügig ab (Grund: nahezu Gewichtskonstanz bei Probekörperdehnung). Je nach Zusammensetzung des Kalksteins und den vorherrschenden Aufheizbedingungen beginnt die Kalksteinentsäuerung im Beton zwischen 600°C und 900°C. Sie führt letztlich zu einem hochporösen Beton ( $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$ ) /2.6./. Bei weiterer Erwärmung fällt die Dichte zuerst weiter ab (Ausdehnung der Probekörper bei nahezu konstantem Gewicht), danach ist jedoch ein leichtes Ansteigen der Dichte zu erwarten (Sinterprozesse). Mit dem Beginn der Schmelzprozesse steigt die Dichte weiter an, vermutlich bis zu einem Wert von etwa  $2,2 \div 2,6 \text{ g/cm}^3$ .

Die silikatischen Betone (vgl. Bild 3.2.) zeigen im Gegensatz zu den kalzitischen Betonen einen etwas steileren Abfall der Dichte im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 700°C, dabei wird die Anfangssteigung wiederum durch die Entwässerung bestimmt, während bei den höheren Temperaturen vor allem die höhere thermische Dehnung der Quarzite für den stärkeren Abfall der Dichte verantwortlich ist. Der Basaltbeton zeigt einen etwas geringeren Dichteabfall, da die basaltischen Zuschläge eine vergleichsweise geringe thermische Dehnung aufweisen. Lediglich durch den Zusatz von quarzitischen Sänden als Feinzuschlag fällt der Dichteabfall in den Bereich des Dichteabfalls für Kiesbetone. Der starke Dichteabfall des Kiesbetons von Harmathy /3.11./ bei 700° C ist unerklärlich. Wahrscheinlich enthalten die Zuschläge einen größeren Anteil an Kalkstein ohne daß der Verfasser darauf hingewiesen hat.

### 3.3. Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität gehört zu denjenigen Materialeigenschaften, die am

finally resulting in a highly porous concrete (density  $1,4 \text{ g/m}^3$ ) /2.6./. On further heating, the density at first continues to decrease (expansion of the specimens at virtually constant weight), but afterwards the density can be expected to increase a little (sintering process). With the start of melting the density increases further, eventually attaining a density about 2.2 to 2.6  $\text{g/cm}^3$ .

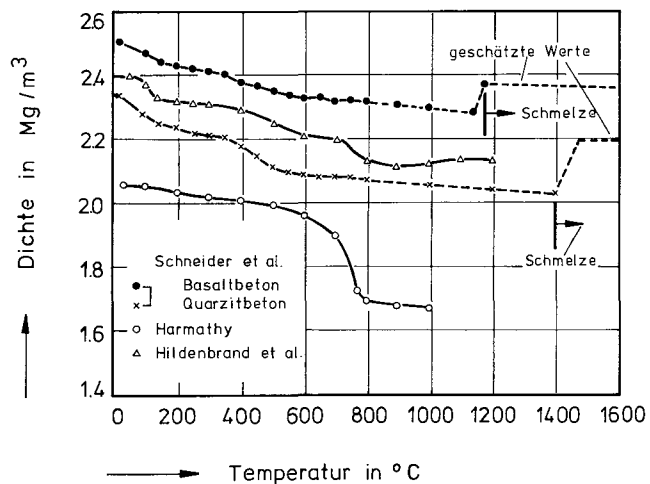


Bild 3.2 : Dichte von Betonen mit silikatischen Zuschlägen

Fig. 3.2 : Density of concretes with siliceous aggregates

In contrast with the calcitic concretes, those made with siliceous aggregates (see fig. 3.2) show a somewhat steeper decline in density in the range between room temperature and 700° C. The initial rise in density is here again determined by the expulsion of water, whereas at higher temperatures it is more particularly the greater thermal expansion of quartzite that is responsible for the sharper decline in density. Basalt concrete shows a rather less marked decrease in density because these aggregates have relatively low thermal expansion. It is only because of the addition of quartzitic sand as fine aggregate that the density decrease of this type of concrete comes within the range of density decrease for concretes made with gravel aggregates. The marked decrease in density of Harmathy's gravel concrete at 700° C is /3.11./ difficult to understand. Probably the aggregates in that concrete contained a substantial proportion of limestone, not pointed out by that author.

wenigsten verstanden werden /3.23./. Bei konstantem Druck ist sie durch

$$c_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

definiert, worin H die Enthalpie, T die Temperatur und p den Druck darstellen. In der Technik wird durchweg die mittlere spezifische Wärmekapazität benutzt. Sie ist definiert durch die Gleichung

$$\bar{c}_p(T) \cdot (T - T_0) = \int_{T_0}^T c_p(T) \cdot dT.$$

Wenn die Erwärmung des Materials durch chemische Umwandlungen begleitet ist, hängt die Enthalpie zusätzlich vom Grad der Umwandlung der Reaktionsprodukte  $\xi$  ab. ( $0 \leq \xi \leq 1$ ), d.h. aus der ersten Gleichung wird dann

$$c_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{p, \xi} + \left( \frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_{p, T} \cdot \frac{d\xi}{dT}.$$

In so einem Fall wird  $c_p$  als "scheinbare" Wärmekapazität bezeichnet. Wenn  $\xi$  nur eine Funktion der Temperatur ist (dieses gilt im allgemeinen nicht für Phasenumwandlungen), kann die vorstehende Gleichung wie folgt umgeschrieben werden:

$$c_p = \tilde{c}_p + \left( \frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_p \cdot \frac{d\xi}{dT}$$

Darin ist der erste Term die sogenannte fühlbare Wärme, wohingegen der zweite Term als latente Wärme bezeichnet wird. In vielen Berichten wird von den einzelnen Autoren nicht zwischen  $c_p$ ,  $\bar{c}_p$  und  $\tilde{c}_p$  unterschieden. Aus diesem Grunde streuen die vorliegenden Daten erheblich. Es scheint jedoch so, daß in vielen Berichten häufig auf  $c_p$  Bezug genommen ist. Aus den vorliegenden Daten lassen sich folgende allgemeine Schlüsse ziehen:

a) Die Art des Betonzuschlags zeigt keinen ausgeprägten Effekt auf die Wärmekapazität bis 800°C. Oberhalb 800°C steigt

### 3.3. Heat capacity

In the context of thermal properties specific heat seems to be that material property which is least understood /3.23./. The specific heat at constant pressure is defined as

$$c_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

where H = enthalpy, T = temperature and p = pressure. In technical reports normally average values of  $\bar{c}_p$  are used. They are defined by the equation:

$$\bar{c}_p(T) \cdot (T - T_0) = \int_{T_0}^T c_p(T) dT.$$

If the heating of the material is accompanied by chemical reactions, the enthalpy is a function of the degree of conversion from the reactants into the products,  $\xi$  ( $0 \leq \xi \leq 1$ ), as well as of temperature. Thus the first equation becomes:

$$c_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{p, \xi} + \left( \frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_{p, T} \frac{d\xi}{dT}.$$

In this case  $c_p$  is usually referred to as "apparent" specific heat. If  $\xi$  is a unique function of the temperature (in most cases not valid for phase transitions) the equation can be rewritten as:

$$c_p = \tilde{c}_p + \left( \frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_p \cdot \frac{d\xi}{dT},$$

where the second term can clearly be recognized as the latent heat and the first term as the sensitive heat contribution to the specific heat. Usually different authors do not distinguish between  $c_p$ ,  $\bar{c}_p$  and  $\tilde{c}_p$ . For this reason scatter of data occurs. However, it seems that in most cases  $c_p$  is reported. From the reported test results it can be stated:

a) Type of aggregate indicates no clear effect on the heat capacity if temperatures below 800°C are considered. Where tempera-

die "scheinbare" Wärmekapazität von Kalksteinbeton infolge der Kalksteinentsäuerung stark an. Die Streuungen in den vorliegenden Daten beruhen auf experimentelle Unsicherheiten.

- b) Das Mischungsverhältnis beeinflusst die Wärmekapazität insoweit als ein höherer Zementgehalt infolge der Dehydratationsreaktionen eine größere latente Wärme erzeugt.
- c) Der Wassergehalt ist entscheidend bezüglich Temperaturen  $< 200^{\circ}\text{C}$ . Wasser-satte Betone zeigen um  $100^{\circ}\text{C}$  eine "scheinbare" Wärmekapazität, die etwa 2mal so hoch ist, wie bei  $105^{\circ}\text{C}$  getrockneten Betonen.

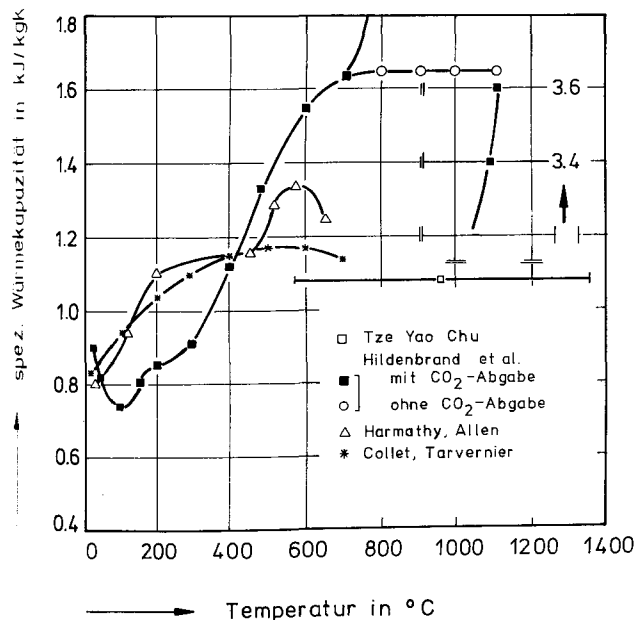


Bild 3.3 : Spezifische Wärmekapazität von Kalksteinbetonen

Fig. 3.3 : Specific heat capacity of lime-stone concretes

Die Bilder 3.3. und 3.4. geben einen Überblick über spezifische Wärmekapazitäten von verschiedenen Betonen. Berücksichtigt man, daß quarzitischer Beton als Hauptbestandteil kristallines  $\text{SiO}_2$  besitzt, müßte sich für quarzitischen Beton bei Raumtemperatur eine spezifische Wärme von ca.  $0,80 \text{ kJ/kgK}$  ergeben. Ein vergleichbarer Wert ist auch für kalzitische Betone zu erwarten.

Die Meßwerte nach Bild 3.3. und 3.4. liegen, unabhängig von der Betonart, abgesehen von

tures of  $800^{\circ}\text{C}$  are exceeded with calcareous concrete  $c_p$  rises immediately due to decarbonization. The scatter of the different data seems to be caused by experimental errors.

- b) The mix proportions influence the heat capacity in so far as richer mixes indicate a higher latent heat due to dehydration effects.
- c) The water content is important at temperatures below  $200^{\circ}\text{C}$ . Wet concretes show around  $100^{\circ}\text{C}$  an apparent specific heat nearly twice as high as oven-dried concretes.

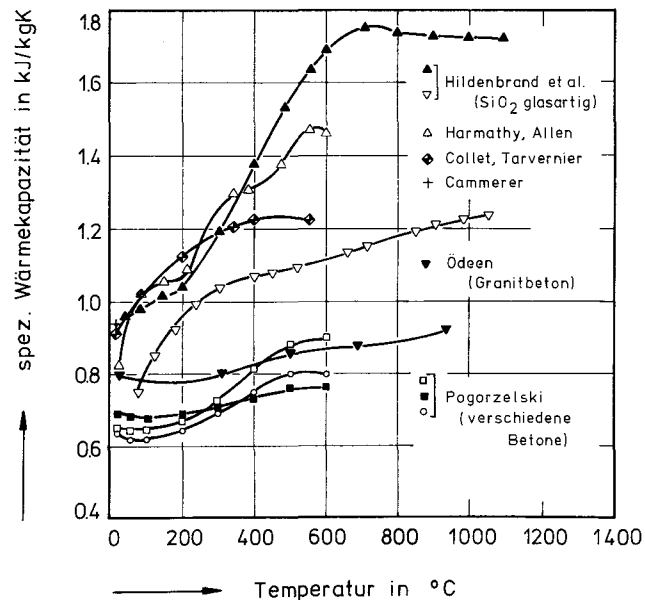


Bild 3.4 : Spezifische Wärmekapazität von Betonen mit silikatischen Zuschlägen

Fig. 3.4 : Specific heat capacity of concretes with siliceous aggregates

Figs. 3.3 and 3.4 summarize the specific thermal capacities of various concretes. Allowing for the fact that quartzitic concrete contains crystalline  $\text{SiO}_2$ , as its main constituent, the specific heat for this kind of concrete at room temperature would have to be approximately  $0.80 \text{ kJ/kgK}$  /2.9./. A rather similar value would also be expected for calcitic concrete.

The measured values plotted in Figs. 3.3 and 3.4 are, irrespective of the type of concrete (and apart from Pogorzelski /3.20./, somewhat above this value. There are probably two reasons for this. For one thing, the

den Werten von Pogorzelski /3.20./, etwas oberhalb dieses Wertes. Dieses dürfte vor allem zwei Gründe haben. Einmal wird die spezifische Wärme durch das vorhandene Wasser erhöht ( $c_p = 4,1868 \text{ kJ/kgK}$ ), und zum anderen tragen die bei hohen Temperaturen ablaufenden Reaktionen, die fast ausnahmslos endotherm verlaufen, zu einer scheinbaren Erhöhung der "spezifischen Wärmen" bei.

Besonders deutlich wird dies an der Kurve von Hildenbrand et al. /2.2./ für den kalzitischen Beton. Je nach dem ob die Kalksteinsäuerung berücksichtigt wird oder nicht, ist bei  $1100^\circ\text{C}$  eine spezifische Wärmekapazität von  $1,65 \text{ kJ/kgK}$  oder von  $3,6 \text{ kJ/kgK}$  gemessen worden. Die tatsächlichen spezifischen Wärmen von Beton dürften, vorausgesetzt alle Reaktionswärmen könnten separat erfaßt und eliminiert werden, etwas oberhalb der spezifischen Wärmen von Normalglas (Tafelglas) liegen.

### 3.4. Wärmeleitfähigkeit

Üblicherweise wird die Wärmeleitfähigkeit unter stationären Temperaturbedingungen ermittelt. Bei derartigen Methoden entstehen jedoch Schwierigkeiten durch den gleichzeitig auftretenden Feuchtetransport im Beton. Der stationäre Zustand ist dann erreicht, nachdem sich unter dem (möglichst kleinen) Temperaturgradienten eine Art Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hat. Dieser Vorgang läuft sehr langsam ab, d.h. bei Messungen im Beton wird ein reiner stationärer Zustand nur angenähert. Üblicherweise wird Beton bei derartigen Messungen deshalb vortrocknet, d.h. man erhält die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Betons.

Bei instationären Messungen, z.B. nach der Heißdraht-Methode, ergeben sich ähnliche Probleme. Diese lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Die experimentellen Schwierigkeiten sind größer als bei stationären Messungen.
- Der Heißdraht hat endliche Abmessungen und eine endliche Wärmekapazität. Da auch der Probekörper endliche Abmessungen besitzt, können Messungen nur so durchge-

specific heat is increased by the presence of water ( $c_p = 4.1868 \text{ kJ/kgK}$ ); furthermore, the reactions occurring at high temperatures which are almost invariably endothermic in character, contribute to causing an apparent increase in "specific heat". This is very clearly manifested by the curve given by Hildenbrand et al. /2.2./ for calcitic concrete. Depending on whether or not the limestone decarbonation is taken into account, the thermal capacity measured at  $1100^\circ\text{C}$  is  $1.65 \text{ kJ/kgK}$  or  $3.6 \text{ kJ/kgK}$ . The actual specific heats of concrete are - provided that all the heats of reaction can be separately estimated and eliminated - presumably a little above those of glasses.

### 3.4. Thermal conductivity

Thermal conductivity is usually measured by steady state test methods. With these methods difficulties arise from combined heat and mass transfer effects due to the moisture in the concrete. The steady state is attained after the moisture is in equilibrium under the influence of temperature gradients. This means, that it is nearly impossible to measure the thermal conductivity of concrete under pure steady state conditions. Normally the concrete must be dried to constant weight at a temperature above the maximum used in the test.

With transient test methods - like the "hot-wire" method - similar problems arise. The difficulties with these methods may be divided into three groups:

- The experimental difficulties are greater than in the steady-state experiments.
- The "hot-wire" has finite dimensions and a finite heat capacity and also the specimen is of finite size, and so the experiment can only be carried out in the time region in which there is no substantial effect from the boundary.
- Concrete from the view of the "hot-wire" is a non-homogeneous medium.

Due to a), b) and c) the measurements are erroneous, and the error is greater than that for steady state methods. The thermal

führt werden, daß keine Beeinflussungen durch Randeffekte auftreten (Meßdauer!).

- c) Beton ist für den Heißdraht ein stark inhomogener Körper.

Entsprechend den vorstehenden Aussagen sind Wärmeleitfähigkeitsmessungen dieser Art häufig fehlerhaft; die Fehler sind durchweg größer als bei stationären Messungen.

Die Leitfähigkeit von Beton hängt ab von den Leitfähigkeiten der Einzelkomponenten. Wesentliche Faktoren die bislang untersucht wurden sind:

- Feuchtegehalt,
- Betonzuschlag,
- Mischungsaufbau,
- Zementart.

Aus den vorliegenden Meßwerten können folgende Schlüsse gezogen werden /3.23./:

- a) Die Wärmeleitfähigkeit von Beton bei 20°C ist dem Feuchtegehalt etwa proportional. Je höher die Wärmeleitfähigkeit eines Betons, um so stärker ist der Verlust an Leitfähigkeit durch Abgabe von Feuchtigkeit während einer Erwärmung. Bei Temperaturen unter 100°C ist der Einfluß der Dampfdiffusion zu beachten.
- b) Der Betonzuschlag beeinflusst die Leitfähigkeit von Beton stark, d.h. bei steigender Leitfähigkeit des Zuschlags steigt auch die Leitfähigkeit des Betons.
- c) Das Mischungsverhältnis bezogen auf die Volumenanteile von Wasser, Zementpaste und Zuschlag beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit von Beton. Zementstein hat abgesehen von Leichtzuschlägen durchweg eine geringere Leitfähigkeit als der Betonzuschlag. Magere Normalbetone besitzen deshalb vergleichsweise höhere Wärmeleitfähigkeiten. Bei Betonen mit Leichtzuschlägen gilt das umgekehrte.
- d) Die Zementart beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit nur insoweit, als die Wasserausfreisetzung bei HOZ-Zementstein gegenüber PZ-Zementstein geringfügig zu höheren Temperaturen verschoben ist.

conductivity of concrete depends on the conductivities of its constituents. The major factors investigated which influence the conductivity are:

- moisture content,
- type of aggregate,
- mix properties,
- type of cement.

From the available data the following conclusions can be drawn /3.23./:

- a) The conductivity of any given concrete varies approximately linearly with moisture content. The higher the conductivity of a specific concrete the greater is the loss in conductivity due to the loss of moisture during heating.
- b) The type of aggregate has an important effect on the conductivity of concrete, i.e. an increase in the conductivity of the aggregate causes an increase of the conductivity of the concrete.
- c) Mix proportions by volume of free water, hydrated cement and aggregate influence the conductivity of concrete. With the exception of lightweight aggregates the cement paste has a lower conductivity than the aggregate, therefore lean mixes tend to have a higher conductivity. In the case of lightweight aggregate concrete the opposite holds.
- d) Type of cement influences the thermal conductivity in so far as in blast furnace slag cement paste, water release occurs at higher temperatures compared to portland cement paste.

The measured values for the thermal conductivity of concrete (see figs.3.5., 3.6. and 3.7.) comprise a very wide ranging set of values over the whole temperature range envisaged. The many reason for such variation is the difference in constitution of different concretes. Besides, the test method and the interpretation of the test results will affect the individual values. As already mentioned a major difficulty in determining the thermal conductivity of concrete is that nearly always linked transport phenomena occur, which complicate the

Die Meßwerte der Wärmeleitfähigkeiten von Beton (vgl. Bild 3.5. bis 3.7.) umfassen im gesamten Temperaturbereich somit ein sehr breites Band. Hauptursache dafür ist

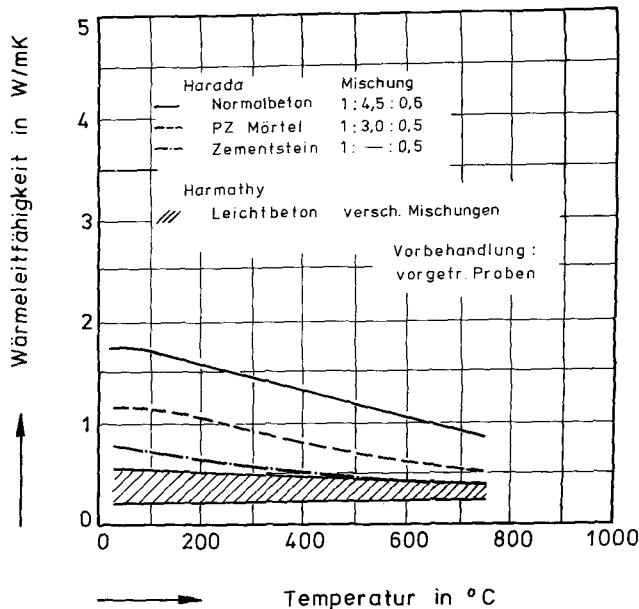


Bild 3.5 : Wärmeleitfähigkeit von Normal- und Leichtbeton, Mörtel und Zementstein

Fig. 3.5 : Thermal conductivity of normal and lightweight concrete, mortar and cement stone

der unterschiedliche Aufbau der Betone. Daneben beeinflussen aber auch die Versuchsmethode und die Interpretation der Versuchsergebnisse die einzelnen Werte. Eine Hauptschwierigkeit bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Beton liegt darin, daß bei der Messung, wie bereits erwähnt, fast immer gekoppelte Transportphänomene auftreten. So hat man es in den meisten Fällen mit einem gekoppelten Massen- und Wärmetransport zu tun, wobei naturgemäß die physiko-chemischen Reaktionen im Beton eine maßgebende Rolle spielen. Da die einzelnen Reaktionen bzw. Transportanteile experimentell meist nicht getrennt werden können, gibt man eine "scheinbare" Wärmeleitfähigkeit an, die nicht allein von der Temperatur, sondern u.U. auch von dem Weg, auf dem diese Temperatur erreicht wurde, abhängt. So hat Maréchal beispielsweise gefunden, daß die Wärmeleitfähigkeit von quarzitischem Beton im jungfräulichen Zustand bei 100°C ein  $\lambda$  von 2,3 W/mK besitzt, während er im wieder erkalteten Zustand nach dem Aufheizen auf 400 bzw. 500°C nur noch ein  $\lambda$  von

measurements. Thus, in most cases there is a combination of mass transport and heat transport in connection with these the physico-chemical reactions in the concrete

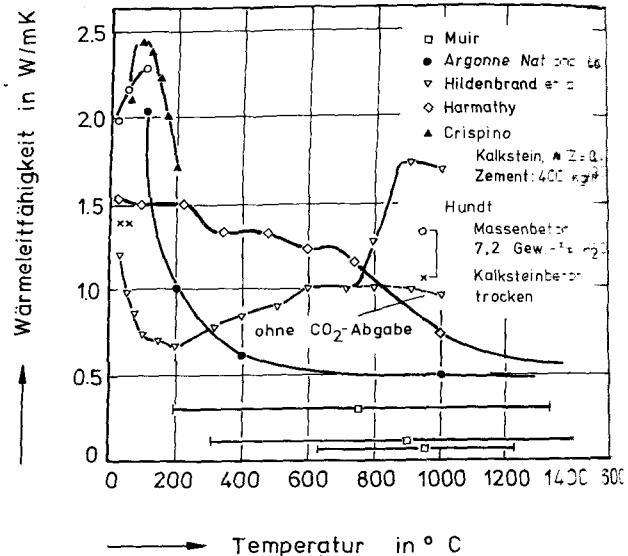


Bild 3.6 : Wärmeleitfähigkeit von Kalksteinbetonen

Fig. 3.6 : Thermal conductivity of limestone concretes

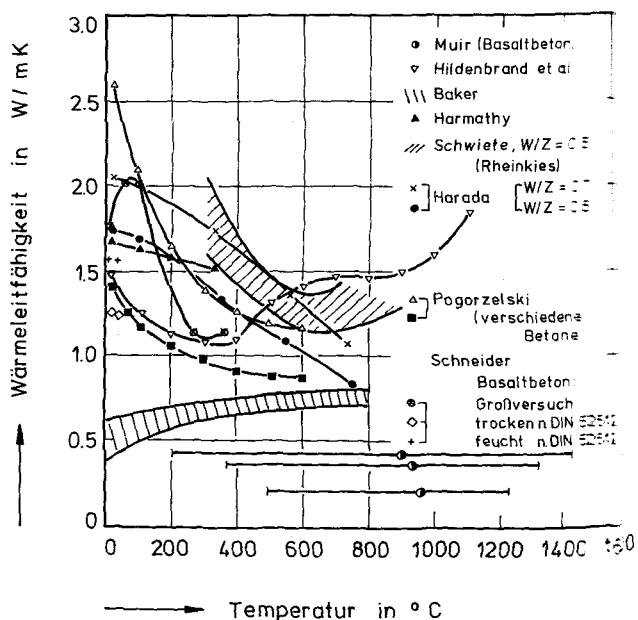


Bild 3.7 : Wärmeleitfähigkeit von silicatischen Betonen

Fig. 3.7 : Thermal conductivity of siliceous concretes

will of course play an important part. Since the individual reactions of transport effects can usually not be separately determined by experimental means, an "apparent" thermal conductivity is stated, which de-

1,4 W/mK zeigt. Die Wärmeleitfähigkeit liegt erwartungsgemäß bei der Höchsttemperatur etwas höher als im abgekühlten Zustand.

Aus transportphänomenologischen Überlegungen läßt sich folgender Temperaturverlauf der Wärmeleitfähigkeit prognostizieren. Bei niedrigen Temperaturen und feuchtem Beton ergeben sich sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten, da einerseits die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffskeletts am größten und auch der Wärmeübergang zwischen den Porenwänden durch die Wasserfüllung vergleichsweise gut ist. Zu höheren Temperaturen hin verbessert sich die "scheinbare" Wärmeleitfähigkeit etwas, weil der Temperaturgradient infolge des kombinierten Wasser- und Wärmetransports geringer wird.

Etwas unterhalb von 100°C nimmt die Wärmeleitfähigkeit wieder ab, weil sich ein Teil der wassergefüllten Poren entleert hat, und sich damit die Wärmeübergangsbedingungen zwischen den Porenwänden verschlechtert haben. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt bis 300 oder 400°C weiter ab, da einerseits die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffskeletts abnimmt (Verringerung der mittleren freien Weglänge der Phononen) und andererseits infolge der Austrocknung die Wärmeübergangsbedingungen im Porenraum noch schlechter werden. Daneben entstehen aber auch schon ab 300°C verstärkt Risse durch Inkompatibilitäten von Zuschlag und Zementstein, wodurch der Wärmeübergang zwischen den Porenwänden weiter an Bedeutung gewinnt.

Erst ab Temperaturen von 600°C ist mit einem leichten Wiederanstieg der Wärmeleitfähigkeit zu rechnen, da jetzt der Wärmetransport zwischen den Porenwänden vorzugsweise durch Strahlung erfolgt ( $\sim T^4$ ). Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur dürfte jedoch nur sehr gering sein, da sich die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffskeletts weiter verringert (mittlere freie Weglängen der Phononen in der Nähe des Schmelzpunktes nur einige 10 Atomlagen).

Bei Temperaturen > 800°C bis zum Einsetzen des Schmelzens dürften sich die Leitfähigkeitswerte des Betons nur geringfügig ändern. Erwartet wird ein geringer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um etwa 0,1 W/mK von 800°C auf 1200°C. Es ist damit zu rech-

penden nicht only on the temperature but in some instances also on the manner in which this temperature was attained. For example, Maréchal found that the thermal conductivity of quarzitic concrete in the virgin state at 100° C is  $\lambda = 2,3$  W/mK, whereas the value for the same concrete cooled after heating to 400 -500° C is only  $\lambda = 1,4$  W/mK. As expected, the thermal conductivity at the highest temperature is somewhat higher than in the cooled state.

From considerations of transport phenomena the following temperature behaviour of the thermal conductivity can be predicted: At low temperatures and with moist concrete very high values for the thermal conductivity exist, because on the one hand the conductivity of the solid skeleton of the material is highest and because furthermore the heat transfer between the walls of the pores or voids is relatively good on account of the water in them. At higher temperatures the "apparent" thermal conductivity becomes somewhat better because the temperature gradient due to combined water and heat transport becomes less steep. A little below 100° C the thermal conductivity decreases again, because the water filled pores are now partly emptied, so that the heat transfer conditions between their walls are less favourable. Up to 300 -400° C there is a further decrease in conductivity, the reason being that, for one thing, the thermal conductivity of the solid skeleton becomes lower (reduction of the average free path of the phonons) and, furthermore, the heat transfer conditions in the pore space of the concrete are further worsened in consequence of drying. On the other hand, however, from temperatures of 300° C onwards, increased cracking develops in consequence of incompatibilities of the aggregates and hardened cement paste, as a result of which the transfer of heat between the pore walls increases.

It is only from 600° C upwards that the thermal conductivity can be expected to rise again a little, because now transport of heat between the pore walls takes place mainly by radiation (proportional to  $T^4$ ). The increase in conductivity with temperature is, however, probably only quite small,

nen, daß der Kalksteinbeton zumindest im entsäuerten Zustand die relativ geringste Wärmeleitfähigkeit zeigt. Die Wärmeleitfähigkeit der Schmelze dürfte gegenüber dem Feststoff kurz vor Schmelzbeginn nur gering abfallen und ca. 1,0-1,2 W/mK für Basaltbeton, quarzitisches Beton und Kalksteinbeton betragen.

### 3.5 Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit von Beton ist durch seine Einzelkomponenten bestimmt. Es kann gesagt werden, daß die Art des Zuschlags, der Mischungsaufbau und der Wassergehalt des Betons die Temperaturleitfähigkeit in ähnlicher Weise beeinflussen, wie vordem für die Wärmeleitfähigkeit beschrieben.

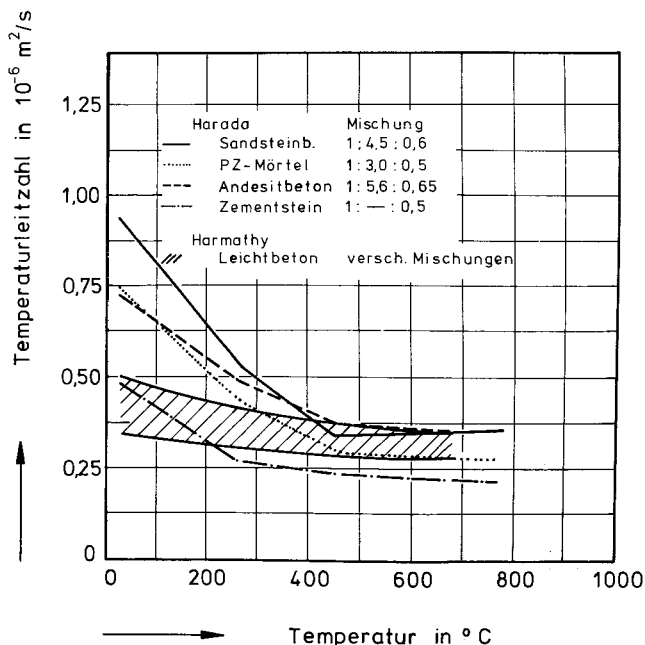


Bild 3.8 : Temperaturleitzahl von Normal- und Leichtbeton, Mörtel und Zementstein

Fig. 3.8 : Thermal diffusivity of normal and lightweight concrete, mortar and cement stone

ben. Deshalb weisen die Temperaturleitfähigkeiten (vgl. Bild 3.8., 3.9. und 3.10.) in etwa die gleiche Tendenz auf wie die Wärmeleitfähigkeiten. Von relativ hohen Werten bei Raumtemperatur ( $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  bis  $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) sinken sie nahezu monoton auf Werte um  $0,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  bei  $1000^\circ\text{C}$  ab. Ledig-

as the conductivity of the solid skeleton further decreases (average free path of the phonons in the neighbourhood of the melting point is equal to only a few tens of atomic layers).

At temperatures above  $800^\circ\text{C}$  and up to the start of melting the changes in the thermal conductivity values of concrete are probably only small. A slight increase of about  $0.1 \text{ W/mK}$  in the range from  $800 - 1200^\circ\text{C}$  can be expected. It must be considered that limestone concrete, at least in the decarbonated state, has relatively the lowest thermal conductivity. The conductivity of the melt is probably only slightly lower than that of the solid concrete just before melting commences and can be presumed to be about  $1.0-1.2 \text{ W/mK}$  for basalt concrete, limestone concrete and quartzitic concrete.

### 3.5. Thermal diffusivity

The thermal diffusivity of concrete is determined by the thermal properties of its constituents. It has been found from the data so far available that the type of aggregate, mix proportion and water content of the concrete have the same effect on the thermal diffusivity as was noted previously for thermal conductivity determinations. Therefore the values of the thermal diffusivity (see figs. 3.8., 3.9. and 3.10.) display roughly the same trend as do those of the thermal conductivity. From relatively high values at room temperature ( $0.6-1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) they decrease almost monotonically to around  $0.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  at  $1000^\circ\text{C}$ . Only the values reported by Tze/2.12./ and Muir /2.4./, which were obtained by a fitting procedure applied to temperature distributions at very high incident heat flux, are distinctly below these values. So far, it has not been possible to find a convincing explanation for this.

Because of the considerable effect of moisture content upon thermal diffusivity and density, the largest differences in the value of the diffusivity are to be observed in the temperature range below  $200^\circ\text{C}$ . At higher temperatures the measured values



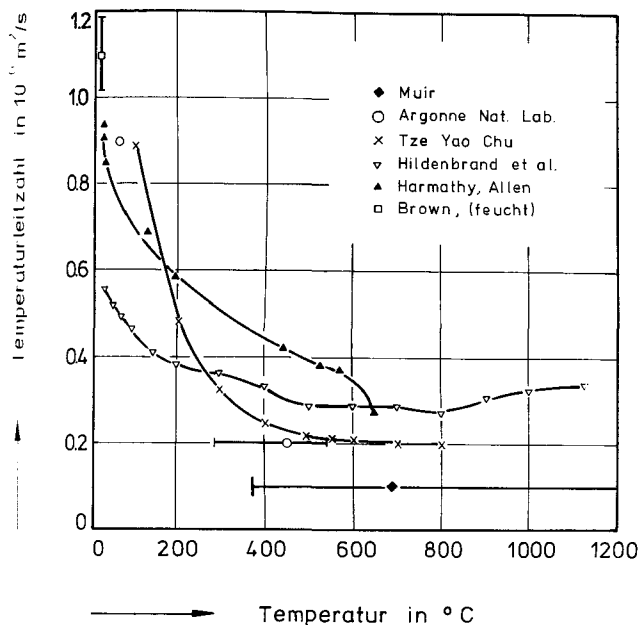


Bild 3.9 : Temperaturleitzahl von Kalksteinbeton

Fig. 3.9 : Thermal diffusivity of limestone concrete

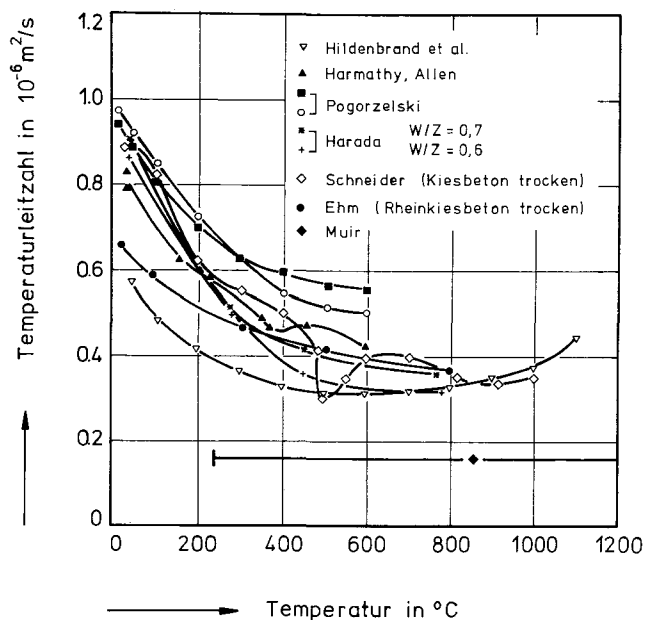


Bild 3.10 : Temperaturleitzahl von silikatischem Beton

Fig. 3.10 : Thermal diffusivity of siliceous concrete

lich die Werte von Tze/2.12./ und Muir /2.2./, die durch Fitten von Temperaturverteilungen bei sehr hohen Wärmestromdichten gewonnen wurden, liegen deutlich unterhalb dieser Werte. Eine plausible Erklärung konnte dafür bisher nicht gefunden werden.

Aufgrund des großen Einflusses der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit und Dichte sind die größten Unterschiede für  $a$  im Temperaturbereich unterhalb 200  $^{\circ}\text{C}$  zu beobachten. Bei höheren Temperaturen liegen die Meßwerte (abgesehen von den Werten von Muir und Tze) relativ eng beieinander. Der Grund für den engeren Streubereich der gemessenen  $a$ -Werte gegenüber dem weiteren Streubereich für die  $\lambda$ -Werte dürfte darin zu sehen sein, daß die Temperaturleitzahl in den meisten Fällen aus instationären Erwärmungsversuchen entnommen werden kann, während bei vielen Arten der  $\lambda$ -Bestimmung zusätzlich  $c_p$  und  $\rho$  mit ihren begrenzten Genauigkeiten in den Auswertungen herangezogen werden müssen. Bei gleichem Erwärmungsverhalten unterschiedlicher Betone ergeben sich u.U. gleiche Werte für  $a$ , während daraus je nach Genauigkeit der  $c_p$ - und  $\rho$ -Daten recht unterschiedliche  $\lambda$ -Werte resultieren können. Für eine Betonschmelze dürften sich vergleichsweise niedrigere Tempera-

(apart from those of Muir and Tze) are relatively close together. The reason for the narrow range of scatter for the values of the thermal diffusivity as compared with the thermal conductivity is perhaps that the diffusivity can in most cases be determined from unsteady-state heating tests, whereas in many methods of determining the conductivity it is additionally necessary to take account of  $c_p$  and  $\rho$  (with their limited accuracy) in the evaluation of the results. For equal heating behaviour of different concretes, equal values for the thermal diffusivity may be obtained in some cases, whereas the corresponding values for the thermal conductivity are liable to differ greatly, depending on how accurate the available values of  $c_p$  and  $\rho$  are. For a concrete melt the thermal diffusivity values are likely to be comparatively low. A realistic value is  $0.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  at 1300 to 1400  $^{\circ}\text{C}$  /2.9./.

### 3.6. Thermal strain

A considerable number of investigations on the thermal expansion of concrete have been carried out. The objectives of thermal ex-

turleitzahlen ergeben. Ein realistischer Wert ist nach vorliegenden Erfahrungen  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  bei  $1300-1400^\circ\text{C}$  /2.9./.

### 3.6. Wärmedehnung

Über die Wärmedehnung von Beton liegt eine große Anzahl von Untersuchungen vor. Gegenstand der Untersuchungen war die Frage, wie die thermische Dehnung durch die Einzelkomponenten des Materials beeinflusst werden und welchen Einfluß die Inkompatibilitäten zwischen den einzelnen Komponenten im Hinblick auf die Hochtemperatureigenschaften von Beton besitzen. Die wichtigsten Forschungsarbeiten über die thermische Dehnung sind in /3.1., 3.4. und 3.14./ diskutiert.

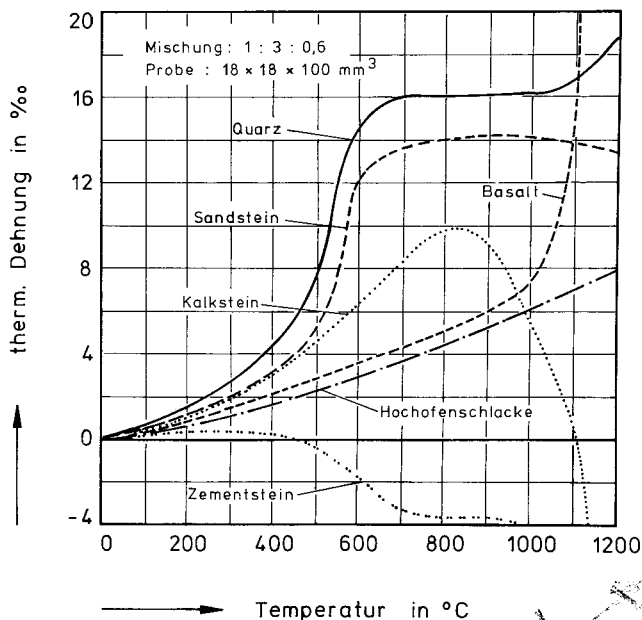


Bild 3.11 : Einfluß der Zuschläge auf die thermische Dehnung von Zementmörteln nach /3.7./

Fig. 3.11 : Influence of the type of aggregate on the thermal expansion of cement mortars according to /3.7./

Aus diesen Berichten und den Bildern 3.11. und 3.12. läßt sich folgendes ableiten:

- Die Wärmedehnung ist eine nichtlineare Temperaturfunktion, auch schon bei relativ niedrigen Temperaturen. Im allgemeinen ist sie irreversibel.
- Haupteinflußgröße ist die Zuschlagart und von den Zuschlägen insbesondere die Fraktion der Grobzuschläge.

pansion measurements concern the question of how the thermal strain is effected by single components of the composite material and how the incompatibilities of the thermal strains of the composites influence the mechanical properties of concrete at high temperatures. The most important test results of thermal strain measurements are reviewed in /3.1., 3.4. and 3.14./. From the reports and figs. 3.11. and 3.12. it can be stated that:

- Thermal strain is a non-linear function of temperature, even at relative low temperatures. Generally it is of irreversible nature.

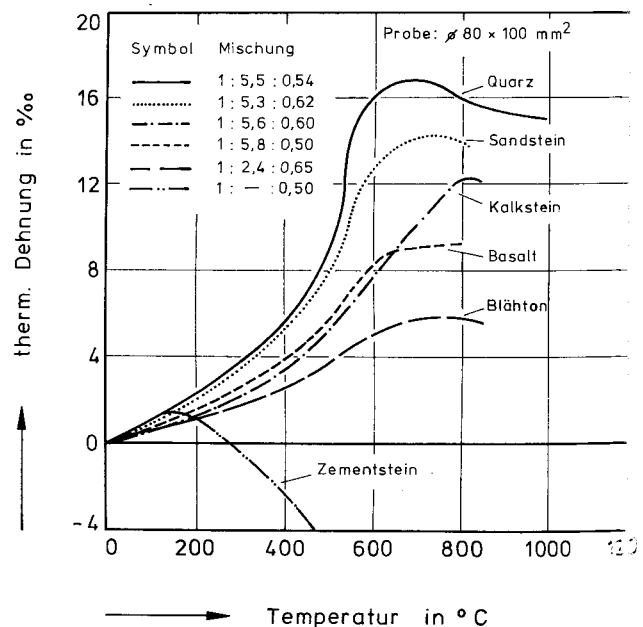


Bild 3.12 : Einfluß der Zuschläge auf die thermische Dehnung von Beton nach /3.23./

Fig. 3.12 : Influence of the type of aggregate on the thermal expansion of concrete according to /3.23./

- The main factor affecting the thermal strain is the type of aggregate, especially the coarse aggregate fraction, which plays a dominant role.
- Pure hydrated cement stone indicates contraction shrinkage at temperatures above  $150 - 400^\circ\text{C}$ .
- At very high temperatures ( $600-800^\circ\text{C}$ ) most concretes indicate no further expansion. In some cases the concrete shrinks.

- c) Reine hydratisierte Zementsteinpaste schrumpft oberhalb 150 bis 800°C .
- d) Bei Temperaturen von 600 bis 800°C dehnen sich Betone meistens nicht mehr aus. In einigen Fällen schrumpfen die Betone infolge chemischer Reaktionen.
- e) Der Feuchtegehalt, Wasser-Zement-Wert und die Zementart sind durchweg nur bei Temperaturen < 200°C von Einfluß.
- f) Die thermischen Dehnungen auf Bild 3.11. und 3.12. beinhalten auch Schwindeffekte. Dieses läßt sich nicht vermeiden, weil solche Versuche durchweg mit unversiegelten Proben durchgeführt werden. Verglichen mit der Dehnung ist das Schwinden jedoch klein, so daß es in praktischen Fällen nicht gesondert zu betrachten ist (> 150°C , unversiegelte Proben).

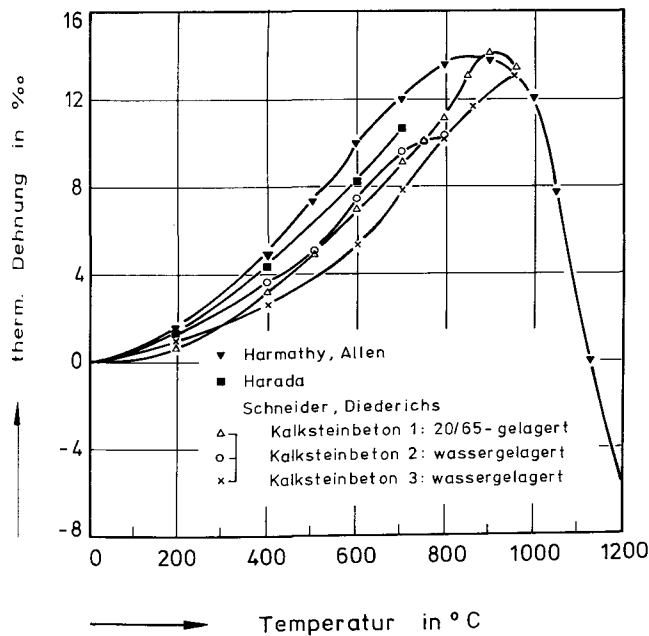


Bild 3.13 : Thermische Dehnung von Kalksteinbetonen

Fig. 3.13 : Thermal expansion of limestone concretes

Die thermische Dehnung von kalzitischen und silikatischen Betonen zeigen die Bilder 3.13. und 3.14.. Bis etwa 900°C steigen die Kurven der kalzitischen Betone nahezu monoton an. Mit zunehmender Kalksteinentsäuerung fällt die thermische Dehnung dann wieder ab. Sie kann je nach Anteil sowie Reinheit des Kalksteins bzw. der Art seiner Verun-

due to chemical or physical reactions in the aggregates.

- e) The moisture content, water/cement ratio, and the type of cement are in general only of relevance at comparatively low temperatures (< 200° C).
- f) The thermal strains on figs. 3.11. to 3.12. include shrinkage. This is unavoidable as the test were performed with unsealed specimens. Compared to the thermal expansion shrinkage strains are small. Therefore and for practical reason they do not need a separate attention, i.e. at > 150° C , unsealed specimens are normally being used.

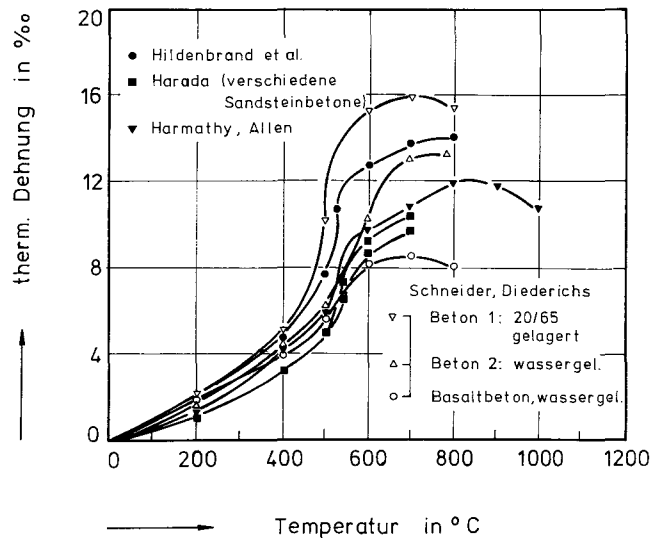


Bild 3.14 : Thermische Dehnung von silikatischen Betonen

Fig. 3.14 : Thermal expansion of siliceous concretes

The thermal expansion of calcitic and siliceous concretes is shown in figs. 3.13. and 3.14.. Up to about 900° C the curves for calcitic concrete rise almost monotonically. With increasing decarbonation of the limestone there then occurs a decrease in expansion and this may, depending on the proportion and purity of the limestone and/or the nature of its impurities, diminish to zero in the temperature range from 1000-1300° C. If temperature is raised still further, the porosity of the decarbonated limestone decreases in consequence of sintering processes. The thermal expansion shows a similar

reinigungen, im Temperaturbereich von  $1000^{\circ}\text{C}$ - $1300^{\circ}\text{C}$  bis auf Null zurückgehen. Bei weiterer Temperatursteigerung nimmt die Porosität des Branntkalks durch Sinterprozesse weiter ab. Die thermische Dehnung verläuft analog, d.h. das Material verdichtet sich. Mit Beginn des Schmelzens tritt eine weitere Verdichtung ein. Nimmt man die Dichte von geschmolzenem Glas ( $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ ) für geschmolzenen Beton als Endzustand der Schmelze an, so errechnet sich ausgehend von der Masse und dem Volumen des Betons bei Raumtemperatur, eine Materialschrumpfung bis zum Schmelzpunkt von etwa 100%.! Die Schmelze dehnt sich wahrscheinlich mit ca.  $10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  aus /2.9./. Im Temperaturbereich unterhalb  $900^{\circ}\text{C}$  ergeben sich Unterschiede in den thermischen Dehnungen vor allem aus dem Feuchtigkeitsgehalt des Betons, der Reinheit des Kalksteins sowie des Anteils an quarzitischen Feinzuschlägen. Deutlicher treten die Unterschiede im Dehnungsverhalten der Betone bei den linearen Ausdehnungskoeffizienten (vgl. Bild 3.15.) auf. So erhält Harmathy /3.11./ offenbar infolge eines zufälligen Quarzanteils (vgl. Bild 3.15., deutlicher Quarzprung bei  $570^{\circ}\text{C}$ ) der Betonmischung auch die höchsten Ausdehnungskoeffizienten. Als untere Grenze für die thermische Dehnung eines Kalksteinbetons dürften die Werte der wassergelagerten Betonmischung 3 (Schneider et al./3.22./) anzusehen sein. Im unteren Temperaturbereich hängt der Ausdehnungskoeffizient übrigens sehr stark vom Wassergehalt ab. Hilsdorf et al./3.14./ kommen nach sehr sorgfältigen Messungen an getrockneten und feuchten Kalksteinbetonen zu dem Schluß, daß feuchte Proben eine erheblich höhere thermische Dehnung im unteren Temperaturbereich aufweisen als getrocknete.

Die thermische Dehnung quarzitischer Betone zeigt tendenzmäßig die gleichen Temperaturabhängigkeiten. Sie ist jedoch im Vergleich zum Kalkstein infolge der höheren thermischen Dehnung des Quarzits etwa doppelt so hoch (vgl. Bild 3.14.). Außerdem tritt infolge der Quarzumwandlung bei  $570^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha \rightarrow \beta$ -Quarz) ein zusätzlicher steiler Dehnungsanstieg auf, der sich bei den linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten besonders deutlich bemerkbar macht (vgl. Bild 3.16.). Basaltbetone zeigen ein etwas

pattern of behaviour, i.e., the material densifies. With the start of melting there is a further increase in density. If the finally attained density of molten concrete is assumed to be equal to that of molten glass ( $2.2 \text{ g/cm}^3$ ), and basing oneself on the mass and the volume of the concrete at room temperature, the contraction that the material undergoes up to melting point is calculated as being about 100%. The melt probably undergoes expansion at a rate of about  $10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  /2.9./. In the temperature range below  $900^{\circ}\text{C}$  there occur differences in thermal expansion which are more particularly due to the moisture content of the concrete, the purity of the limestone and the proportion of quartzitic fine aggregates.

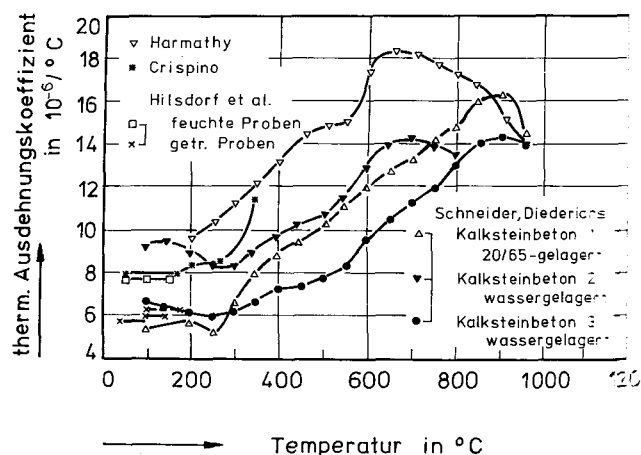


Bild 3.15 : Ausdehnungskoeffizienten von Kalksteinbetonen

Fig. 3.15 : Expansion coefficients of limestone concretes

The differences in the expansion behaviour of concretes are more distinctly reflected in the linear expansion coefficients (see fig. 3.15.). Thus, Harmathy /3.11./, evidently on account of the fortuituous presence of quartz (see fig. 3.15., showing a distinct "quartz jump" at  $570^{\circ}\text{C}$ ) in the concrete mix, obtains the highest thermal expansion coefficients. The values obtained for the concrete 3 stored in water (Schneider et al./3.22./) can probably be regarded as representing the lower limit for the thermal expansion of a limestone concrete. In the lower part of the temperature range the expansion coefficient is moreover dependent to a high degree upon the water content. Hilsdorf et al./3.14./ basing themselves on very careful measurements per-

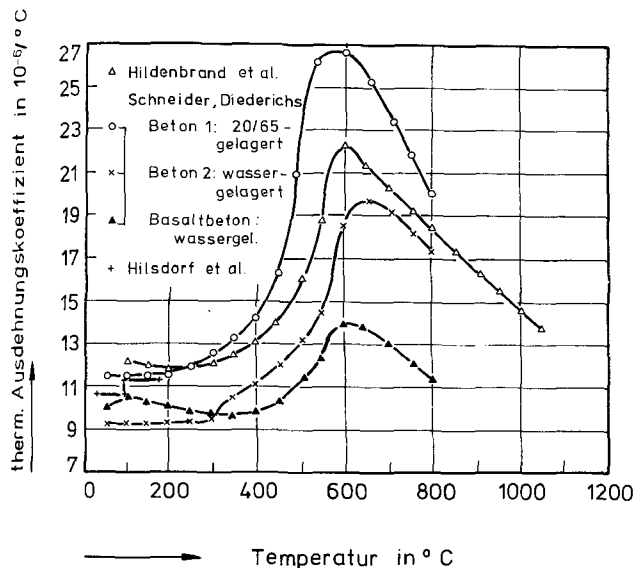


Bild 3.16 : Ausdehnungskoeffizienten von silikatischen Betonen

Fig. 3.16 : Expansion coefficients of siliceous concretes

abweichendes Verhalten, denn im Gegensatz zu den grobkristallinen Quarziten hat das Basaltgestein einen feinkristallinen Aufbau mit den Hauptbestandteilen Plagioklas, Augit und Olivin. Das äußert sich besonders im Fehlen des Quarzsprunges, der geringeren thermischen Dehnung und im niedrigen Schmelzpunkt des Gesteins.

Ab etwa 700°C zeigen jedoch auch die silikatischen Betone ein Schrumpfen, das zunächst auf das Schrumpfen des Zementgesteins mit anschließender Zersetzung der CSH-Phasen zurückzuführen ist. Oberhalb von 1100°C dürften dann zunächst Sinterprozesse, daran anschließend die Schmelzprozesse einsetzen. Die silikatische Betonschmelze hat ebenso wie die Betonschmelze von kalzitischen Betonen nach Abschnitt 3.2 eine Dichte von etwa 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Damit wäre dann bis zum vollständigen Erschmelzen eine Material-schrumpfung zu erwarten, die von der Ausgangsdehnung bei 20°C nur sehr gering abweichen dürfte. Durch umfangreiche Messungen anderer Autoren (s.z.B./3.7., 3.8. und 2.9./) werden diese Annahmen gestützt.

Bild 3.17. faßt die wichtigsten Einflußgrößen zusammen, die die Wärmedehnung des Betons bei 20°C bestimmen. Auf der Abzisse ist der Volumenanteil der Zuschlagstoffe im Beton, auf der Ordinate die Wärmedehnzahl

gebildet on dried and on moist limestone concretes, come to the conclusion that moist concrete specimens have a considerably higher thermal expansion in the lower part of the temperature range than dried ones have.

The thermal expansion of quartzitic concretes shows the same trends as regards its temperature dependence. However, it is about twice that of limestone concrete on account of the higher thermal expansion of quartzite (see fig. 3.14.). Moreover in consequence of the transformation that quartz undergoes at 570°C (from the  $\alpha$  to the  $\beta$  form) there occurs an additional steep increase in expansion which is especially pronounced in the linear coefficient of thermal expansion (see fig. 3.16.). Basalt concretes display a somewhat different type of behaviour because basalt has a fine crystalline structure (containing as main minerals plagioclase, augite and olivine) as against the coarsely crystalline structure of quartzite aggregates. This difference is manifested more particularly in the absence of the "quartz jump", in the lower thermal expansion and in the low fusion point of basalt.

From about 700°C onwards, however, the siliceous concretes also exhibit contraction, which initially is attributable to the contraction of the hardened cement paste, followed by decomposition of the CSH phases. Above 1100°C there presumably first occur sintering processes, then melting processes. The siliceous concrete melt, like the melt obtained from calcitic concrete, according to Section 3.2 has a density of about 2.2 g/cm<sup>3</sup>. Thus, up to complete melting, the contraction that the material can be expected to undergo will probably differ only very little from the initial expansion at 20°C. These assumptions receive extensive support from comprehensive measurements by other investigators (for example, see /3.7., 3.8. and 2.9./).

Fig. 3.17. summarizes the important factors which determine the thermal strain of concrete at 20°C. The horizontal axis shows the aggregate content per volume, the vertical axis shows the coefficient of thermal

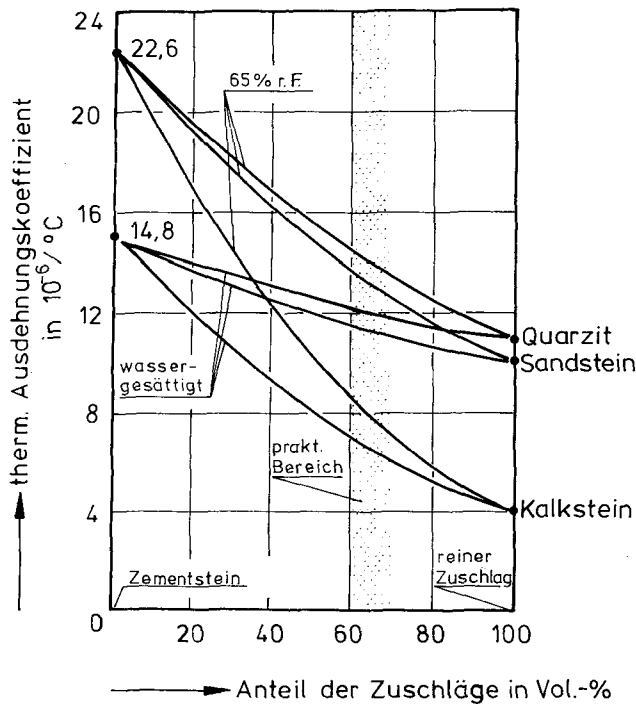


Bild 3.17 : Ausdehnungskoeffizient von Beton in Abhängigkeit vom Zuschlaganteil

Fig. 3.17 : Expansion coefficient of concrete in dependence upon the aggregate content

des Betons angegeben. Bei einem Volumenanteil von 0% findet man maximale Wärmedehnzahlen des Zementsteins von  $23 \cdot 10^{-6}/K$  (bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit) und minimale Dehnzahlen von  $15 \cdot 10^{-6}/K$  (wasser-satt) /3.4./. Die Punkte auf der zu 100% Zuschlagstoff gehörenden Ordinate stellen die Ausdehnungskoeffizienten typischer Zuschlagstoffe dar. Der für Reaktorbetone übliche Zuschlagstoffanteil von 60-70 Vol.-% ist auf Bild 3.17. hervorgehoben.

Bild 3.18. ist wie Bild 3.17. aufgebaut; jedoch ist hierbei auf der Abzisse der Volumenanteil des Grobzuschlags > 2 mm Durchmesser angegeben /3.24./. Die im Reaktorbau verwendeten Betone haben einen Grobzuschlaganteil von 40-50 Volumenprozent. Theoretische Arbeiten zur rechnerischen Ermittlung der Wärmedehnzahlen von Betonen wurden von /3.4./ und /3.14./ durchgeführt.

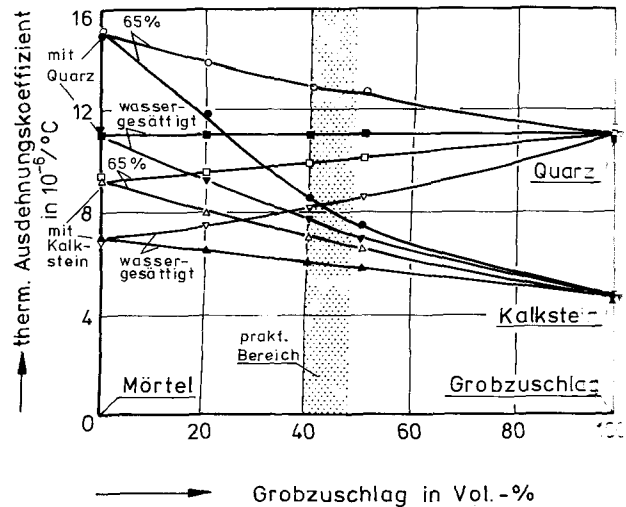


Bild 3.18 : Ausdehnungskoeffizient von Beton in Abhängigkeit von Mörtel- und Grobzuschlaganteil

Fig. 3.18 : Expansion coefficient of concrete in dependence upon the mortar- and coarse aggregate content

expansion of the concrete. With 0 per cent aggregate content the expansion of pure cement stone is at maximum (about  $23 \cdot 10^{-6}/K$  with 65 per cent rel.humidity). Water saturated cement stone indicates lowest expansion values of  $15 \cdot 10^{-6}/K$  /3.4./. 100 per cent aggregate content indicates typical expansion values of concrete aggregates. Normally reactor concretes contain 60 to 70 per cent of aggregate. The area is indicated on fig. 3.17. by hatching.

Fig. 3.18. is similar to fig. 3.17. but the horizontal axis shows the aggregate content per volume with aggregates of > 2 mm diameter onward /3.24./. Typical aggregate contents in reactor design normally lie between 40 to 50 per cent. Theoretical methods which enable the prediction of thermal expansions of concretes were published by /3.4./ and /3.14./.

### 3.7. Literatur

### Literature

- /3.1./ Aschl, H.: Mechanische Eigenschaften von Mass beton unter erhöhten Temperaturen (Mechanical properties of mass concrete at high temperatures). Research Report, TU München, 1977, (unpublished).
- /3.2./ Collet, Y.; E. Tavernier: Etude des propriétés du béton soumis à des températures élevées. Groupe de Travail, Comportement du Matériau Béton en Fonction de la Température, Bruxelles, Nov. 1976.
- /3.3./ Crispino, E.: Studies on the technology of concretes under thermal conditions. ACI-SP-34, Concrete for Nuclear Reactors, Volume I, ACI, Detroit 1972.
- /3.4./ Dettling, H.: Die Wärmedehnung der Zemente, Gesteine und von Beton (Thermal strain of cement stone, aggregate and concrete). Dissertation, TH Stuttgart, 1959.
- /3.5./ Dougill, J.W.: Some effects of thermal volume changes on the properties and behaviour of concrete. Proc. International Conference, The Structure of Concrete, London 1965, pp. 449-513, William Clowes and Sons, Ltd., London, 1968.
- /3.6./ Eibl, J.; Waubke, N.V.; Klingsch, W.; Schneider, U.; Rieche, G.: Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im Reaktor-druckbehälterbau (Investigation on concrete properties for PRRV design). DAfStB, Heft 237, 1974.
- /3.7./ Endell, K.: Versuche über Längen- und Gefügeänderungen von Betonzuschlagstoffen und Zementmörteln unter Einwirkung von Temperaturen bis 1200°C (Tests on the thermal expansion and decomposition of concrete aggregates and cement mortar under influence of temperatures to 1200°C). Schriftenreihe des DAfStb., Heft 60, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1928/29.
- /3.8./ Endell, H.: Über die Einwirkung hoher Temperaturen auf erhärtetem Zement, Zuschlagstoff und Beton (Concerning the effect of high temperature on hardened cement, aggregate and concrete). Zement, pp 823 - 828, 1926.
- /3.9./ Harada, T.: The thermal expansion of concrete at high temperatures. Japan. Tokyo Institute of Technology. Dissertation Pt. 1.2, Tokyo, Photostat. pp 26 + diagrs., 1962.
- /3.10./ Harada, T. et al: Strength, Elasticity and Thermal Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperatures. ACI Seminar on Concrete for Nuclear Reactors, West Berlin, October 1970.
- /3.11./ Harmathy, T.Z.: Thermal properties of concrete at elevated temperatures. Res. Paper No.426, NRCC, Ottawa, March 1970.
- /3.12./ Harmathy, T.Z., and L.W. Allen: Thermal properties of selected masonry unit concretes. Journal of the ACI (70), No. 2, 1973
- /3.13./ Harvey, R.D.: Nonlinear thermal expansion of coarse grain limestone. Materials Research a. Standards., Vol.7, No.11, pp 502-506, 1967.
- /3.14./ Hilsdorf et al: Vorherbestimmung und Kontrolle des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton (Prediction of thermal expansion coefficients of concretes). DAfStB, Heft 305, 1979
- /3.15./ Hundt, J.: Wärme und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles (Heat and moisture transport in concrete). DAfStB, Heft 256, 1975.

- /3.16./ Kießl, K.; Gertis, K.: Nichtisothermer Feuchtetransport in dickwandigen Betonteilen von Reaktorbehältern (Moisture transport in thick concrete walls of PCRV's). DAFStB, Heft 280, 1977.
- /3.17./ Makagonov, V.A.: Influence of kind and grade of concrete on distribution of temperature fields in constructions under short exposure of temperature. Revue of high schools, Part Building and Architecture, N. 11, 1973.
- /3.18./ Maréchal, J.-C.: Contribution a l'étude des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, 23. Jahrg., Oktober 1970, Nov. 274
- /3.19./ Maréchal, J.-C.: Thermal conductivity and thermal expansion coefficients of concrete as a function of temperature and humidity. ACI-Int. Seminar on CNR, Berlin, 1970.
- /3.20./ Pogorzelski, J.A.: Thermal properties of some building materials. Report to RILEM-Committee 44-PHT, Warszawa, 1979.
- /3.21./ Schneider, U.; Kordina, K.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Konstruktionsbetons 2.3 des Kernkraftwerkes SNR-Kalkar. Gutachterliche Stellungnahme, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1976.
- /3.22./ Schneider, U.; Diederichs, U.: Physikalische Eigenschaften von Beton und Stahl im Bereich 20°C bis zum Schmelzen. (Physical properties of concrete and steel from 20°C to melting). Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, März 1980 (unpublished).
- /3.23./ Schneider, U. et al.: Effect of Fire on Concrete, Draft: Paper I, RILEM Committee 44-PHT, Braunschweig 1980 (unpublished).
- /3.24./ Walker, S.; Bloem, D.L.; Mullen, W.G.: Effects of temperature changes on concrete as influenced by aggregates. ACI Journal, Proc. Vol. 48, pp 661/678, 1952.
- /3.25./ Woolson, I.H.: Wärmeleitfähigkeit von Beton (Heat conductivity of concrete). Proceedings ASTM, Vol. 7, S. 406 ff, 1907.

#### 4. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Beton mit verschiedenen Versuchsmethoden

##### 4.1. Versuchsmethoden

Materialeigenschaften sind eng mit den zu ihrer Ermittlung angewandten Versuchsmethoden verknüpft. Die Möglichkeit, Materialeigenschaften in Materialgleichungen umzusetzen, hängt somit von vielen Faktoren ab.

#### 4. Determination of mechanical properties of concrete by different test methods

##### 4.1. Test methods

Material properties are closely related to the specific test method employed. Therefore the possibility of conversion of such properties into material equations depends on many factors. If mechanical properties are



Soweit es die mechanischen Eigenschaften betrifft, müssen geeignete rheologische Modelle entwickelt werden. In vielen Fällen ist dieses nicht ohne weiteres möglich, so daß Versuchsmethoden angewandt werden müssen, die mit den in der Praxis vorliegenden Verhältnissen eng verknüpft sind /4.1./.

Hochtemperatureigenschaften von Beton können unter Zugrundelegung verschiedener Gesichtspunkte bestimmt werden. Im Fall einer Brandbeanspruchung unterliegt das Material z.B. einem instationären Temperaturprozeß, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, Messungen und Versuche bei instationären Temperatureinwirkungen durchzuführen. Die so ermittelten Materialeigenschaften müssen von solchen Eigenschaften unterschieden werden, die unter stationären Temperaturbedingungen ermittelt werden.

Bei Hochtemperaturversuchen sind die drei wesentlichen Versuchsparameter die Aufheizung, die mechanische Beanspruchung und die Verformung. Sie können im Versuch entweder konstant oder veränderlich gehalten werden. Sechs praktische Versuchskombinationen, die sich daraus ergeben, sind auf Bild 4.1. dargestellt und nachstehend beschrieben:

#### Stationäre Versuche

- I. Spannung-Dehnungs-Beziehung (lastgesteuert): Die unbelastete Probe wird auf die Versuchstemperatur (T) gebracht, die Temperatur wird konstant gehalten, eine Spannung ( $\sigma$ ) wird lastgesteuert ( $\dot{\sigma}$ ) aufgebracht und die Verformung ( $\epsilon$ ) wird gemessen. Die Messung ergibt  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen gemäß Bild 4.2., woraus die Druck- oder Zugfestigkeit, der Elastizitätsmodul und die maximale Bruchdehnung ermittelt werden können.

considered, adequate rheological models must be developed. In many cases this is not possible, therefore test methods, which are closely related to practical conditions, are to be preferred /4.1./.

The properties of concrete at elevated temperatures can be defined by starting from a number of different viewpoints. Under fire conditions materials are subjected to transient processes and therefore there is an urgent need for the measurement of those properties, which are determined under transient temperature conditions. These properties should be distinguished from other properties derived under steady state conditions.

With high temperature test the three main test parameters are heating, the application of the load and the control of strain. These can have fixed or constant values or be varied during testing giving transient conditions. Six practical regimes, which can be used for determining mechanical properties, are illustrated in fig.4.1. and described below:

#### Steady state tests

- I. Stress-strain relationships, normally stress rate controlled: The specimen is heated without load to a specified temperature (T), the temperature is stabilized, a load is applied at a controlled rate of stress ( $\dot{\sigma}$ ) and measurement made of the strain ( $\epsilon$ ). The data provide  $\sigma$ - $\epsilon$  relationships of the type shown in fig. 4.2. and can be used to establish compressive or tensile strength, modulus of elasticity and ultimate strain at collapse.

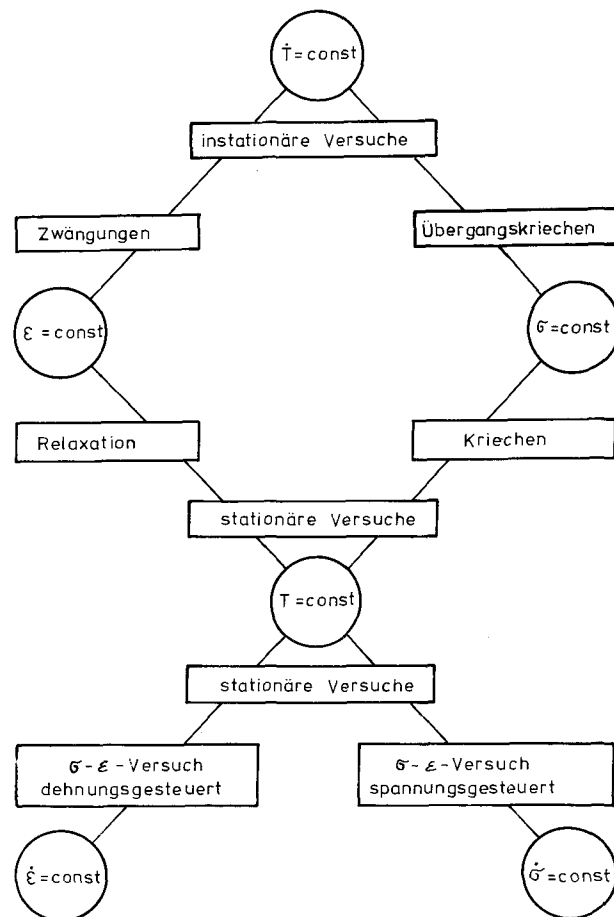


Bild 4.1 : Verschiedene Versuchsbereiche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Beton nach /4.1./

Fig. 4.1 : Different testing regimes for determining mechanical properties of concrete according to /4.1./

II. Spannungs-Dehnung-Beziehung (dehnungsgesteuert): Die unbelastete Probe wird auf die Versuchstemperatur ( $T$ ) gebracht, die Temperatur wird konstant gehalten, eine Spannung  $\sigma$  wird dehnungsgesteuert ( $\dot{\epsilon}$ ) aufgebracht und der Spannungszustand der Probe wird gemessen. Die Messung ergibt  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen gemäß Bild 4.3.. Sie können zur Ermittlung der unter I. erwähnten Eigenschaften sowie zur Bestimmung der mechanischen Bruchenergie verwendet werden.

II. Stress-strain relationships, strain rate controlled: The specimen is heated without load to a specified temperature ( $T$ ), the temperature is stabilized, a load is applied to a controlled strain rate ( $\dot{\epsilon}$ ) and measurement made of the stress ( $\sigma$ ) level in the specimen. The data provide  $\sigma$ - $\epsilon$  relationships of the type shown in fig. 4.3. and can be used to establish not only properties mentioned in (I) but also mechanical dissipation energy.

III. Langzeitkriechen: Im stationären Kriechversuch wird die Probe auf die gewünschte Temperatur gebracht und dann belastet. Die Belastung wird konstant gehalten, die Verformung ( $\epsilon_{cr}$ ) wird gemessen. Die Messung liefert Verformungswerte ( $\epsilon$ ) in Abhängigkeit von der Zeit ( $t$ ), bei verschiedenen Temperaturen ( $T$ ), wobei i.a. lange Zeiträume betrachtet werden (Bild 4.4.).

IV. Relaxation: Die Probe wird wie unter III. angegeben beheizt und belastet. Die anfängliche Verformung zum Zeitpunkt  $t = t_0$  wird jedoch konstant gehalten und die Spannungsabnahme wird über einen längeren Zeitraum verfolgt. Die Messung liefert Spannungswerte ( $\sigma$ ) in Abhängigkeit von der Zeit ( $t$ ), bei verschiedenen Temperaturen ( $T$ ) (Bild 4.5.).

III. Long term creep: In steady state creep tests the specimens are heated to a specified temperature and then loaded, the load is kept constant and measurements made of strain ( $\epsilon_{cr}$ ) which occurs. The data provide a relationship between strain ( $\epsilon$ ) and time ( $t$ ) at different temperatures with time extending over a long period (fig.4.4.).

IV. Relaxation: The specimen is heated to a specified temperature and then loaded as in III. However the initial strain at  $t = t_0$  is kept constant and measurements made of reduction in stress ( $\sigma$ ) over a long period of time. The data (fig. 4.5.) enable a relationship to be developed between stress ( $\sigma$ ) and time ( $t$ ) at temperature ( $T$ ).

#### Instationäre Versuche

V. Instationäres Kriechen: Vor der Aufheizung wird die Probe konstant belastet. Die Aufheizung erfolgt mit einer vorgegebenen Aufheizrate ( $\dot{T}$ ) und die Verformungen ( $\epsilon$ ) werden gemessen bis das Versagen der Probe eintritt. Die Messungen ergeben  $\epsilon - t$ -Beziehungen und ermöglichen die Bestimmung kritischer Versagenstemperaturen ( $T_{cr}$ ) für bestimmte Ausnutzungsgrade ( $\alpha$ ) (Bild 4.6.).

VI. Zwängungen: Bevor die Aufheizung mit konstanter Aufheizrate ( $\dot{T}$ ) beginnt wird die Probe belastet. Die Anfangsverformung wird konstant gehalten, durch Veränderung der Auflast während des Temperaturanstiegs. Die Messung ergibt  $\sigma - t$ -Beziehungen für verschiedene Ausnutzungsgrade ( $\alpha$ ) zum Zeitpunkt  $t = t_0$  (Bild 4.7.). Sie können jeweils auch als Zwangsspannung ( $\sigma$ ) in Abhängigkeit von der Temperatur ( $T$ ) infolge der Temperatureinwirkung aufgefaßt werden, weil zwischen  $t$  und  $T$  eine lineare Beziehung besteht.

#### Transient tests

V. Transient creep: A load is applied to the specimen before heating, heating proceeds at a specified rate ( $\dot{T}$ ), the strain ( $\epsilon$ ) measurements are taken until failure occurs when the strain rate is approaching infinity. Data show a relationship between strain and time ( $\epsilon/t$ ) and enable critical temperature ( $T_{cr}$ ) values for different stress levels ( $\alpha$ ) to be established (fig. 4.6.).

VI. Restraint force: A load is applied to the specimen to establish initial strain, before heating at a specified rate ( $\dot{T}$ ). The initial strain is maintained by adjusting the load until the applied stress level fall to zero. Data provide a relationship between stress ( $\sigma$ ) and time ( $t$ ) for different initial stress/strain levels ( $\alpha$ ) (fig. 4.7.). The data can be also expressed as a relationship between restraint forces ( $\sigma$ ) and temperature ( $T$ ) developed as a consequence of heating.

#### 4.2. Versuchsdurchführungen

Die Bestimmung von Materialkennwerten ist eng mit der jeweiligen Versuchsmethode verknüpft. Eine gesonderte Beschreibung von bestimmten Methoden ist deshalb wichtig und wird im folgenden vorgenommen. Detaillierte Versuchsempfehlungen werden jedoch nicht gegeben. Grundsätzlich ist bei Betonversuchen der Feuchtehaushalt der Betonproben zu beachten, da alle mechanischen Eigenschaften des Betons davon beeinflusst werden. Bei den im folgenden beschriebenen Versuchsdurchführungen können somit entweder unversiegelte oder versiegelte Betonproben zur Anwendung kommen. Unversiegelte Proben werden bei Temperaturuntersuchungen angewendet, die im Zusammenhang mit der Erforschung des Brandverhaltens von Beton stehen (üblicherweise  $T > 150^{\circ}\text{C}$ ). Versiegelte Proben werden bei Temperaturuntersuchungen angewendet, die im Zusammenhang mit der Erforschung des Verhaltens von Beton für den Reaktorbau stehen (üblicherweise  $T < 250^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.2. Test Procedures

The evaluation of material properties is closely related to the specific test condition employed. A specific description of each method is therefore important and will be given below. Detailed recommendations on methods of testing are of course outside the scope of this paper. With concrete tests the moisture content of the specimens must be considered, as nearly all mechanical properties depend on the relative humidity of the pores in the concrete. The following test procedures can be performed with sealed or unsealed concrete specimens. Unsealed test specimens are used with temperature investigations which are related to fire research of concrete, whereby normally  $T > 100^{\circ}\text{C}$ . Sealed test specimens are used with temperature investigations which are related to concrete for PCRV's, whereby normally  $T < 250^{\circ}\text{C}$ .

##### I. $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (lastgesteuert)

Im Versuch wird die Probe auf die gewünschte Temperatur ( $T_1$ ,  $T_2$  oder  $T_v$ ) gebracht, wobei zum Zeitpunkt  $t = 0$  eine konstante Aufheizrate ( $\dot{T}$ ) eingestellt wird (s. Bild 4.2a.). Aus praktischen Erwägungen (Probengröße und unter Zugrundelegung von Brandbedingungen) sollte die Aufheizrate bei 0.1 bis 10 K/min liegen. Wenn die Versuchstemperatur  $T_v$  erreicht ist, muß diese konstant gehalten werden, bis sich ein homogenes Temperaturfeld eingestellt hat. Nach dieser Vorheizperiode  $t_v^*$  wird die Probe lastgesteuert ( $\dot{\sigma} = \text{const}$ , s. Bild 4.2b.) beansprucht. Bild 4.2c. zeigt typische Versuchsergebnisse, woraus sich Werte wie Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchdehnung bestimmen lassen. Die Versuchsergebnisse hängen etwas von der Beanspruchungsgeschwindigkeit  $\dot{\sigma}$  ab.

##### I. $\sigma$ - $\epsilon$ -tests (stress rate controlled)

During the test the specimen is heated to the desired test temperature ( $T_1$ ,  $T_2$  or  $T_v$ ) starting at time  $t = 0$  with a constant heating rate  $\dot{T}$  (see fig. 4.2a.). For practical reasons (size of the specimen and taking it to account exposure in fire conditions) the heating rate should be in the range of 0.1 K/min to 10 K/min. When the test temperature  $T_v$  is reached this is maintained until a homogenous temperature distribution is achieved. After this initial preheating period at time say  $t_v^*$ , the specimen is subjected to a constant rate of loading  $\dot{\sigma} = \text{const}$  (see fig. 4.2b.). Typical test results are indicated in fig. 4.2c.. From the test data the modulus of elasticity, the compressive strength and the ultimate strain can be determined. The test results are influenced by the rate of loading.

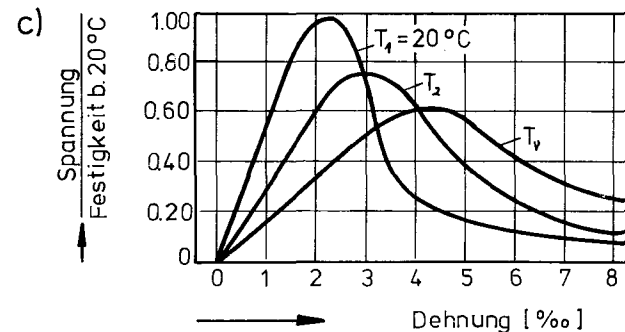
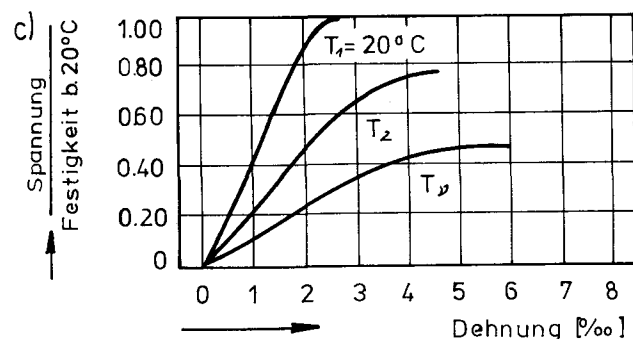
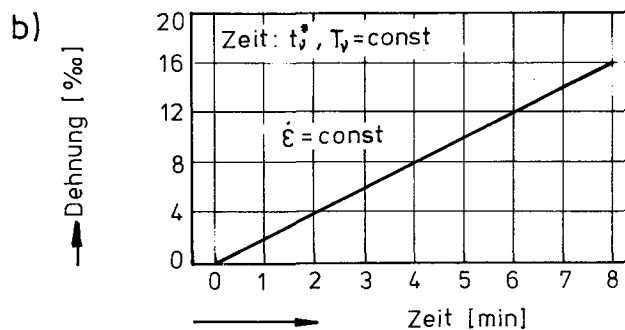
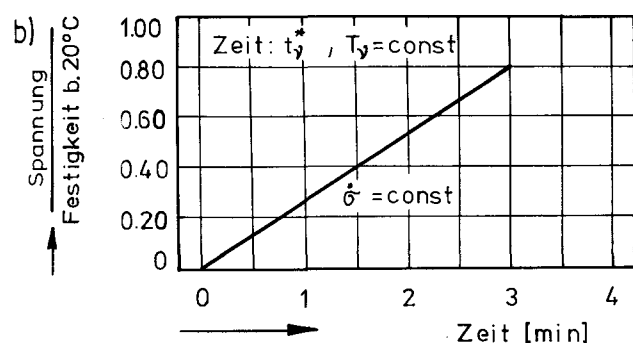
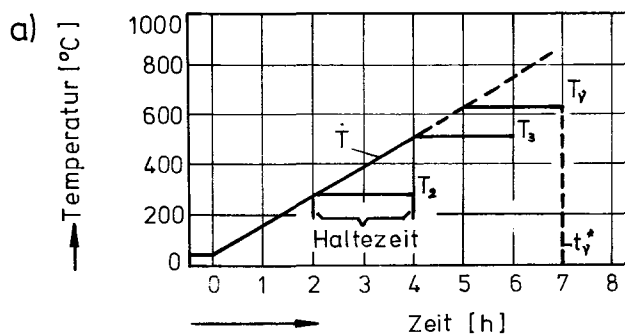
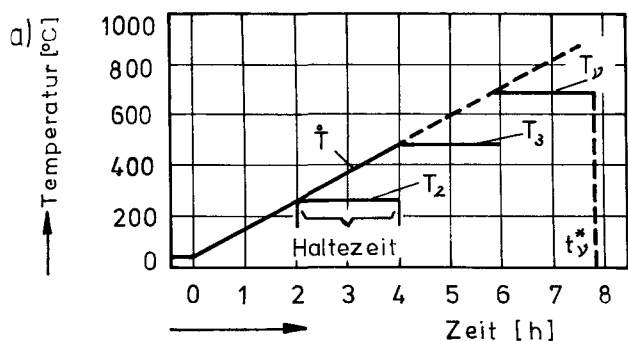


Bild 4.2 : Stationäre lastgesteuerte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche

Fig. 4.2 : Steady state stress rate controlled  $\sigma$ - $\epsilon$ -tests

Bild 4.3 : Stationäre dehnungsgesteuerte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche

Fig. 4.3 : Steady state strain rate controlled  $\sigma$ - $\epsilon$ -tests

## II. $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (dehnungsgesteuert)

Die Versuchsmethode hängt eng mit der vor dem beschriebenen Methode I. zusammen. Die Probe wird ebenfalls mit konstanter Aufheizrate  $\dot{T}$  auf die gewünschte Temperatur  $T_y$  gebracht. Nach der Vorheizperiode  $t_y^*$  wird die Probe entsprechend der vorgegebenen Dehngeschwindigkeit ( $\dot{\epsilon}$ ) belastet (s. Bild 4.3b.). Daraus ergeben sich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen gemäß Bild 4.3c.. Mit dieser Versuchsmethode können vollständige  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen ermittelt

## II. $\sigma$ - $\epsilon$ -tests (strain rate controlled)

This test method is closely related to the stress controlled  $\sigma$ - $\epsilon$  tests previously discussed. The specimen is heated to the required temperature  $T_y$  at a constant heating rate  $\dot{T}$ . After the initial heating period when the specimen has reached a constant temperature it is loaded at a constant strain rate  $\dot{\epsilon}$  (see fig. 4.3b.). This procedure yields  $\sigma$ - $\epsilon$  curves as indicated in fig. 4.3c. Within this kind of test complete  $\sigma$ - $\epsilon$  cur-

werden, so daß es möglich ist, die Höhe der Bruchenergie (Dissipationsenergie) bis zur vollständigen Zerstörung der Probe zu bestimmen. Es ergibt sich somit die Möglichkeit, mit solchen Versuchen die Druckfestigkeit, Elastizität, maximale Bruchdehnung und maximale Bruchenergie zu ermitteln, wobei die vorgegebene Dehngeschwindigkeit geringen Einfluß auf die Meßergebnisse hat.

### III. Stationäre Langzeitkriechversuche

Der Probekörper wird (langsam) auf  $T_v$  erwärmt. Sobald sich thermisches Gleichgewicht eingestellt hat ( $t = t^*$ ) wird die Last aufgebracht. Temperatur ( $T_v$ ) und Last ( $\alpha_\mu$ ) werden im Versuch konstant gehalten. Typische Versuchsergebnisse zeigt Bild 4.4c.. Zum Zeitpunkt  $t^*$  tritt eine spontane elastische Verformung auf, daran anschließend beginnt der Kriechvorgang. Das Schwinden muß anhand von Vergleichsproben ohne Last ( $\alpha_\mu = 0$ ) ermittelt und berücksichtigt werden.

### IV. Relaxationsversuche

Zunächst wird eine Aufheizung der Probe entsprechend den Kriechversuchen III. vorgenommen (s. Bild 4.5a.). Zum Zeitpunkt  $t = t^*$  (thermisches Gleichgewicht) wird die Last aufgebracht und die spontane Verformung ( $\epsilon$ ) gemessen. Die Verformung ( $\epsilon$ ) wird während der nun folgenden Versuchsperiode konstant gehalten (s. Bild 4.5b.). Bild 4.5c. zeigt typische Versuchsergebnisse, d.h. die bezogenen Spannungen ( $\Phi$ ) können in Abhängigkeit von der Zeit ( $t$ ) kontinuierlich angegeben werden.

### V. Instationäre Kriechversuche

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Probe belastet (Belastungshöhe  $\alpha_v$ , s. Bild 4.6b.). Danach wird sie gemäß Bild 4.6a. mit konstan-

ves can be measured and from this it is possible to determine the maximum mechanical energy the specimen dissipates (ultimate mechanical dissipation energy) until it is totally destroyed. From these tests the limits of elasticity, the compressive strength, the ultimate strain (the strain related to the maximum stress level) and the ultimate mechanical dissipation energy, can be determined. The test results are influenced by the strain rate.

### III. Steady state long term creep test

The test specimen is (slowly) heated to the desired temperature  $T_v$ . When thermal equilibrium is reached ( $t = t^*$ ) the load is applied. The temperature  $T_v$  and the load  $\alpha_\mu$  applied are kept constant during the whole test period. Typical test results are shown in fig. 4.4c. At time  $t^*$ , when the load is applied, instantaneous elastic deformation occurs and thereafter under sustained constant load creep deformation takes place. Shrinkage must be considered separately by using unloaded reference specimens ( $\alpha_\mu = 0$ )

### IV. Relaxation test

Initially a heating procedure analogous to the steady state creep test is applied (see fig. 4.5a.). At time  $t^*$  when thermal equilibrium is reached the load is applied and the instantaneous elastic strain recorded. The initial strain is kept constant during the whole test period (see fig. 4.5b.). Fig. 4.5c. shows typical test results with the stress levels at time  $t$  as a percent of the initial stress level applied at  $t^*$ .

### V. Transient creep test

At time  $t = 0$  the specimen is subjected to a certain constant applied load  $\alpha_v$  (see fig. 4.6b.). It is then subjected to a con-

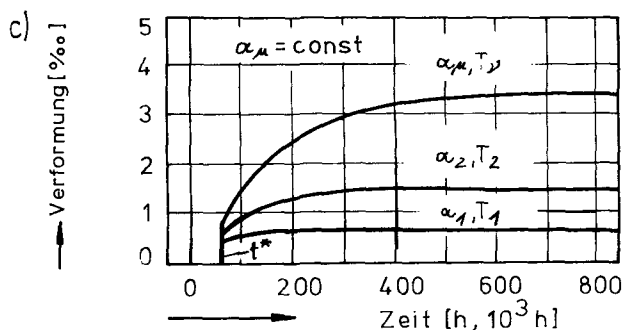
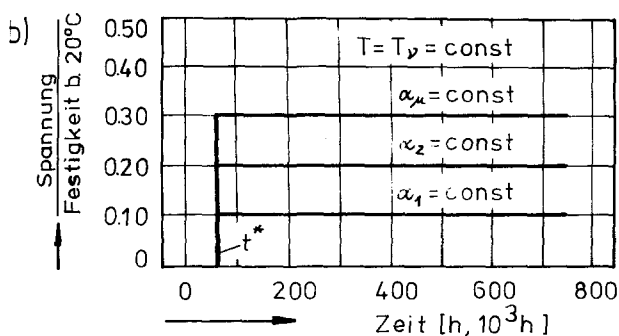
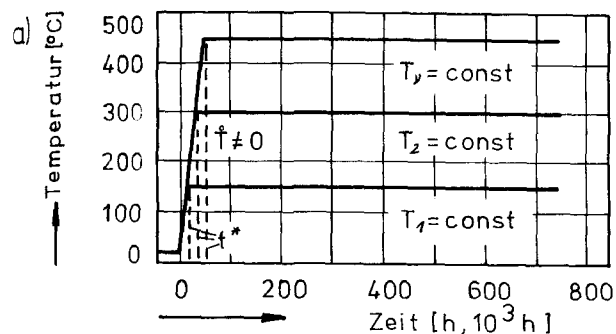


Bild 4.4 : Stationäre Langzeitkriechversuche

Fig. 4.4 : Steady state long term creep tests

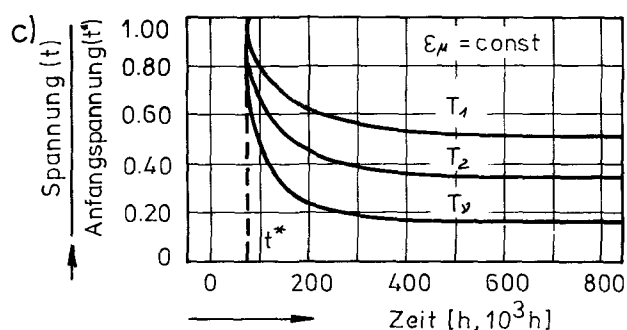
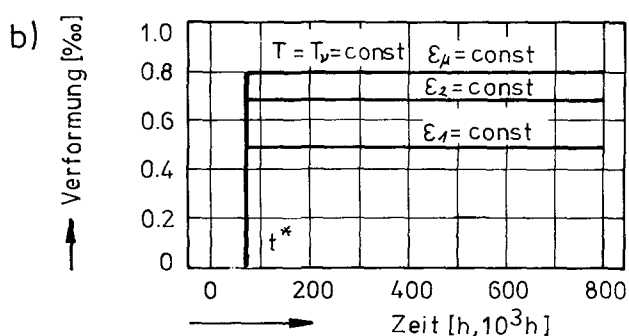
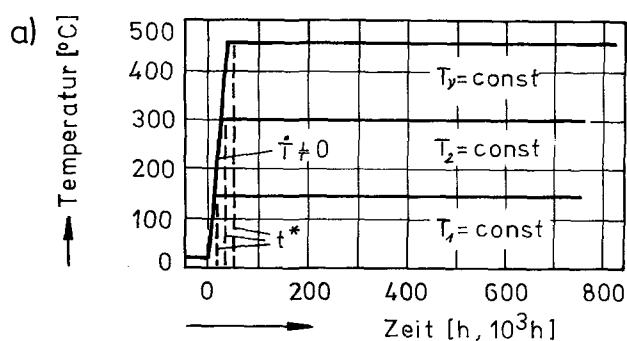


Bild 4.5 : Stationäre Relaxationsversuche

Fig. 4.5 : Steady state relaxation tests

ter Aufheizrate  $\dot{T}$  erwärmt, wobei aus praktischen Erwägungen (Probenabmessung, Aufheizung im Brandfall) Aufheizraten von 0.1 bis 10 K/min in Frage kommen. Es wird bis zum Versagen der Probe geheizt. Zum Versagenszeitpunkt wird die Verformungsgeschwindigkeit der Probe sehr groß (theoretisch: unendlich, s. Bild 4.6c.). Die diesem Zeitpunkt zugeordnete Versagenstemperatur wird kritische Betontemperatur ( $T_{cr}$ ) genannt. Bild 4.6c. zeigt dazu einige qualitative Versuchsergebnisse.

stant heating rate (see fig. 4.6a.). For practical reasons (size of the specimen and taking into account exposure to fire conditions) the heating rate should be in the range of 0.1 K/min to 10 K/min. Heating is continued until failure occurs. The specimen reaches its failure point, when the strain rate (see fig. 4.6c.) becomes very high (theoretically at infinity). The temperature associated with this point is called the critical concrete temperature  $T_{cr}$ . Typical results of these tests are indicated in fig. 4.6c. (scheme).

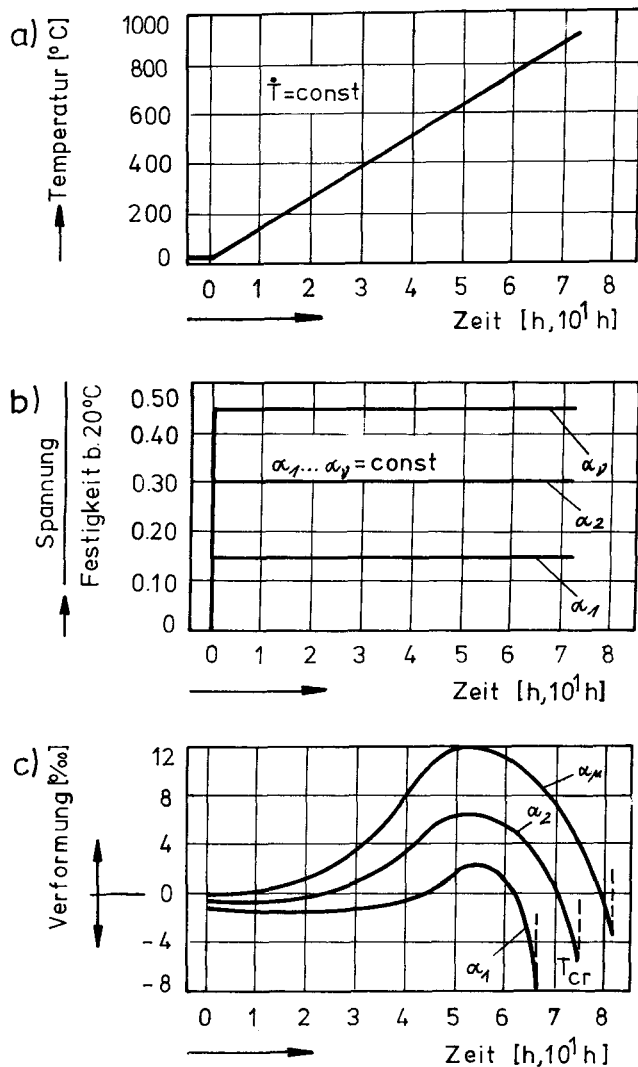


Bild 4.6 : Instationäre Übergangskriechversuche

Fig. 4.6 : Nonsteady state transient creep tests

#### VI. Zwängungsversuche

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Probe mit konstanter Last  $\alpha_{0,v}$  beansprucht (s. Bild 4.7c.). Die anfängliche Verformung ( $\epsilon_v$ ) wird gemäß Bild 4.7b. gemessen. Danach wird die Probe mit einer vorgegebenen Aufheizrate ( $\dot{T}$ ) beheizt (s. Bild 4.7a.), wobei  $\epsilon_v$  konstant gehalten wird. Dies erfolgt durch kontinuierliche Veränderung der äußeren Beanspruchung ( $\alpha = \alpha(t)$ ). Die Aufheizung wird üblicherweise solange fortgesetzt, bis die Beanspruchung ( $\alpha_{t,v}$ ) unter den ursprünglichen Wert ( $\alpha_{0,v}$ ) fällt und gegen Null geht. Bild 4.7c. zeigt dazu einige qualitative Versuchsergebnisse.

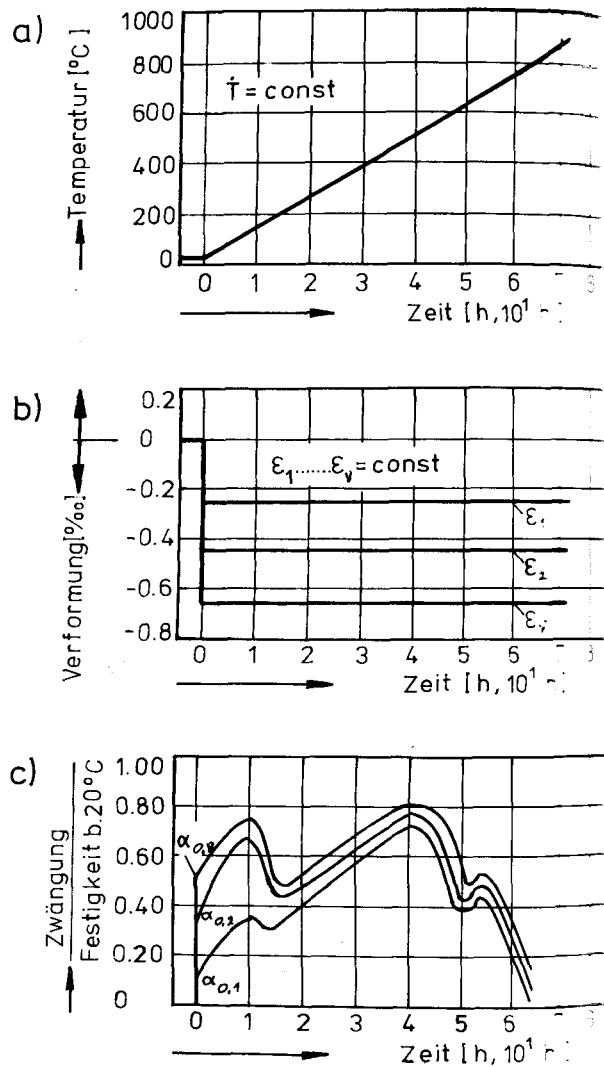


Bild 4.7 : Instationäre Zwängungsversuche

Fig. 4.7 : Nonsteady state restraining tests

#### VI. Restraining test

The concrete specimen is loaded at time  $t = 0$  up to given constant stress level  $\alpha_{0,v}$  (see fig. 4.7c.). The initial compressive strain  $\epsilon_v$  is recorded (fig. 4.7b.). After that it is subjected to a constant heating rate (see fig. 4.7a.). The initial elastic strain is kept constant during the whole heating period by continuously varying the applied external load ( $\alpha = \alpha(t)$ ). Heating is usually continued until the load level  $\alpha_{t,v}$  drops below its original value and approaches zero. Typical results are shown in fig. 4.7c. (scheme).



#### 4.3. Anwendung von Versuchsdaten

Grundsätzlich ist bei der praktischen Anwendung von Versuchsdaten zu beachten, daß die oben beschriebenen Methoden immer nur ein bestimmtes Verhalten des Materials umfassen. Die beiden letztgenannten Versuchsmethoden - instationärer Kriechversuch und Zwängungsversuch - simulieren vor allem den Aufheizprozeß in einem Betonbauteil beispielsweise bei Feuereinwirkung. Sie ergeben Daten, die zur Beschreibung von Brand- und ähnlichen instationären Bedingungen. Die stationären Kriech- und Relaxationsversuche übertreffen demgegenüber in ihrem zeitlichen Ablauf das Geschehen in Brandfällen deutlich, so daß die unter solchen Bedingungen gewonnenen Daten eher zur Beschreibung von Vorgängen unter lang andauernden Temperatureinwirkungen geeignet sind (Beispiel: PCRV).

Viele Betonversuche wurden bisher als Kurzzeittemperaturversuche ausgeführt. Solche Versuche sind einfach durchzuführen, wobei in fast allen Fällen lediglich Druckfestigkeiten bestimmt wurden. Dieses ist vor allem auf experimentelle Schwierigkeiten zurückzuführen, die sich aus der erforderlichen Verformungsmessung bei hohen Temperaturen ergeben. Verformungsmessungen sind jedoch besonders wichtig, um eine Vorstellung über das tatsächliche Materialverhalten bei Temperatureinwirkung zu gewinnen.  $\sigma - \epsilon$ -Beziehungen, die bei stationären Versuchen gewonnen werden, hängen ab von der Vorheizperiode, der Belastungs- bzw. Dehnungsgeschwindigkeit und der Belastungsgeschichte während der Aufheizperiode. Sie sind zu unterscheiden von solchen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, die aus instationären Kriechversuchen gewonnen werden können.

Die Anwendung von Materialeigenschaften in theoretischen Arbeiten kann somit auf verschiedener Grundlage erfolgen. Sie hängt von dem jeweiligen Problem, der Zielsetzung und der angestrebten Qualität in den Ergebnissen ab. Der Bericht gibt lediglich eine zusammenfassende Übersicht über die Materialeigenschaften selbst. Er soll jedoch auch bezüglich des Problems der Anwendung

#### 4.3. Practical use of data

In connection with the application of data it should be kept in mind that each method described above determines a specific feature of material behaviour. The last two of these test methods - transient creep tests and restraining tests - simulate the heating process in a concrete member e.g. real fire situations. They give data of direct relevance for fire and similar transient conditions. The steady state creep and relaxation tests, on the other hand, exceed the duration of a fire, often by several orders of magnitude and therefore being representative for long term behaviour of the structural elements e.g. PCRV's.

Much data concerning the behaviour of concrete have been derived from short-term steady state tests. These tests are easier to perform but in most cases the compressive strength only was determined. This is due to experimental difficulties, which often occur in connection with strain measurements at high temperatures. Strain measurements are important in order to get an idea of the total response of the material under high temperature conditions.  $\sigma - \epsilon$ -relations derived under steady state conditions depend on the initial heating period before the test temperature is reached, the stress or strain rate and the load history during heating. They cannot be compared with stress-strain-relations determined by transient creep tests, respectively.

The use made of material properties in theoretical studies may have a different basis. It depends on the individual problem, the objective and the quality of result required. This report gives a condensed survey of the present state of knowledge in the field of material properties, which may assist in giving an answer to the problems, which require the application of test data. Our experiences suggest a need for more research in the field of converting high temperature test data into material equations, which can then be used successfully in practical applications. Different

von Versuchsdaten Hilfestellung geben. Die Erfahrung zeigt, daß gegenwärtig noch Schwierigkeiten bestehen, Materialdaten in anwendungsorientierte Materialgleichungen umzuschreiben. Zur Beschreibung des Verhaltens von thermisch beanspruchten Betonbauteilen wurden unterschiedliche Modelle entwickelt. In den Modellen sind jeweils "stationäre", "instationäre" oder "gemischte" Daten entsprechend dem gewählten Detaillierungsgrad enthalten. Eine Diskussion dieser Materialmodelle liegt jedoch nicht innerhalb des vorgesehenen Themenkatalogs.

models for determining the structural behaviour of concrete under temperature exposure have been developed. The models are steady state, transient state and mixed state and have different degrees of sophistication. Their individual discussion is beyond the scope of this paper.

#### 4.4. Literatur Literature

/4.1./ Schneider, U. et al.: Behaviour of concrete at high temperatures. Draft: Paper I, RILEM Committee 44-PHT, October 1981 (unpublished).

#### 5. Mechanische Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen

#### 5. Mechanical properties of concrete at high temperatures

##### 5.1. Allgemeines

##### 5.1. General

In diesem Abschnitt wurden mechanische Eigenschaften von Beton anhand der bekanntgewordenen Forschungsergebnisse diskutiert. Die aufgeführten Daten basieren auf einer umfangreichen Literaturrecherche - eigene Versuchserfahrungen sind jedoch ebenfalls berücksichtigt. Hinter jedem Abschnitt sind aus Gründen der Übersicht die zugehörigen Literaturstellen angegeben. Die Darstellung der Daten erfolgt aufgrund einer subjektiven Wertung der vorliegenden Forschungsberichte. Weitere Daten können nachträglich hinzugefügt werden. Mit Rücksicht auf das umfangreiche Datenmaterial ist die Diskussion teilweise auf eine stichwortartige Zusammenstellung wichtiger Ergebnisse reduziert.

In this section the mechanical properties of concrete derived from different research investigations are discussed. The following data are based essentially on a comprehensive literature survey but own test data are included. Most of the literature references are given after each subsection to make the report easy to survey. The presentation of data ensued from a preliminary screening of individual reports to find the relevant data and characteristics of concrete at high temperatures. Further data may be added in the future. With respect to the large amount of data available the discussion is partly reduced to a few summarizing statements on the important test results.

## 5.2. Druckfestigkeit

### 5.2.1. Versuchsergebnisse

Die Druckfestigkeit von Beton war Gegenstand vieler Untersuchungen. Die meisten Versuche wurden gemäß Bild 4.2. durchgeführt, doch seit einigen Jahren liegen auch solche Daten vor, die in Versuchen gemäß Bild 4.3. ermittelt wurden. Dehnungsgesteuerte Festigkeitsversuche sind hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit vorzuziehen, weil die Ergebnisse unabhängig von dem vorliegenden Belastungssystem sind. Wesentliche Parameter, die bisher untersucht wurden, sind:

- Mischungsverhältnis,
- Art des Zuschlags,
- Art des Zements,
- Beanspruchung während der Aufheizung.

Die wesentlichen Untersuchungsergebnisse, die an nicht versiegelten Betonproben gewonnen wurden, sind auf den Bildern 5.2.1. bis 5.2.4. zusammengestellt. Es sollte beachtet werden, daß diese Versuche i.a. im Hinblick auf den Brandfall durchgeführt wurden. In vielen Arbeiten sind die Belastungsgeschwindigkeiten nicht angegeben, allerdings scheint im Bereich üblicher Belastungsgeschwindigkeiten kein deutlicher Einfluß auf die Hochtemperaturfestigkeit zu bestehen. Aus der Literatur (s. Abschnitt 5.2.2.) und den Bildern 5.2.1. bis 5.2.4. lassen sich folgende allgemeine Schlussfolgerungen ziehen:

- a) Die Ausgangsfestigkeit des Betons hat wenig Einfluß auf die Festigkeits-Temperaturbeziehung.
- b) Das Wasser/Zement-Verhältnis hat im Bereich üblicher Werte keinen Einfluß auf die Festigkeitstemperaturbeziehung.
- c) Das Zuschlag/Zement-Verhältnis hat einen deutlichen Einfluß auf die Temperaturab-

## 5.2. Compressive strength

### 5.2.1. Test results

The compressive strength of different concretes has been the subject of many investigations. Most tests have been performed according to fig. 4.2., but for a few years now data has been available from tests carried out according to fig. 4.3.. Strength tests with a controlled strain rate are preferred because the results are not affected by the type of loading system. The main features studied are:

- mix proportion,
- type of aggregate,
- cement type,
- stress level during heating.

The main findings of the investigations with unsealed concrete specimens are summarized in figs. 5.2.1. to 5.2.4.. It should be noted, that the tests under discussion were generally performed with respect to fire research. In most cases the loading rates have not been stated, however, it seems that within a normal range loading rates have negligible influence on high temperature strength characteristics. From the literature (see chapter 5.2.2.) and the figs. 5.2.1. to 5.2.4. the following general conclusions can be drawn:

- a) Original strength of concrete has little effect on strength-temperature characteristics.
- b) Water/cement ratio within the practical range of usage for concrete hardly influences the high temperature strength characteristics of concrete.
- c) Aggregate/cement ratio has a significant effect on the strength of concrete ex-

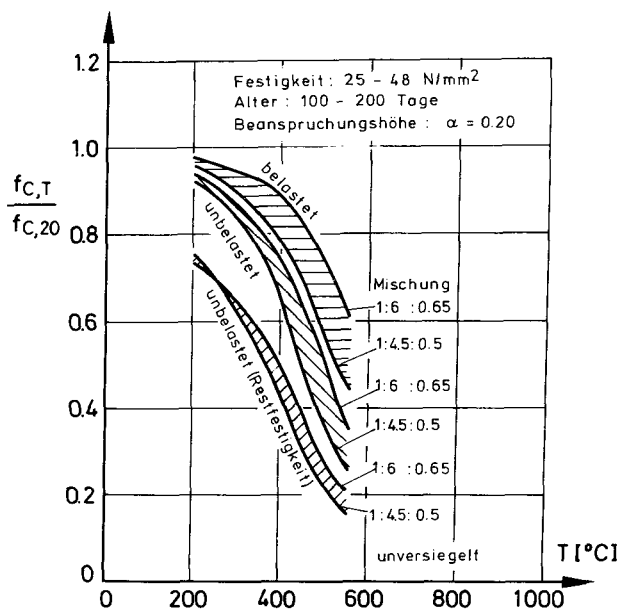


Bild 5.2.1 : Einfluß der Betonmischung und Versuchsbeanspruchung auf die Druckfestigkeit von Beton nach /5.2.26./

Fig. 5.2.1 : Influence of the concrete mix and test procedure on the compressive strength of concrete according to /5.2.26./

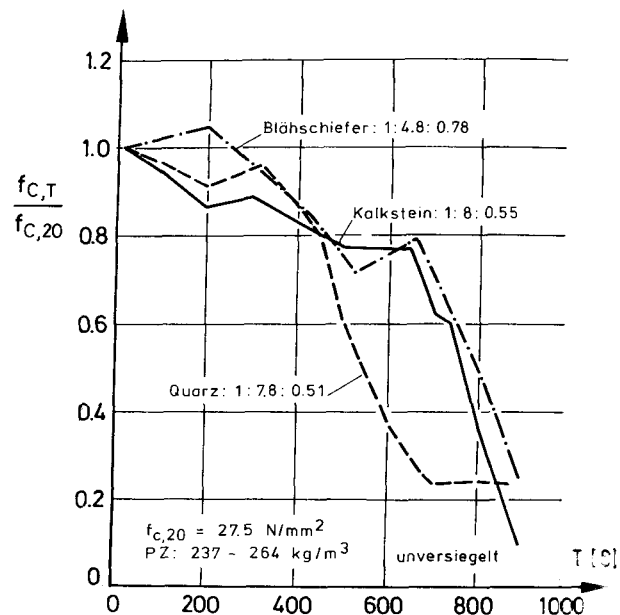


Bild 5.2.2 : Einfluß der Zuschlagart auf die Hochtemperatur-Druckfestigkeit nach /5.2.1./

Fig. 5.2.2 : Influence of the type of aggregate on the high temperature compressive strength according to /5.2.1./

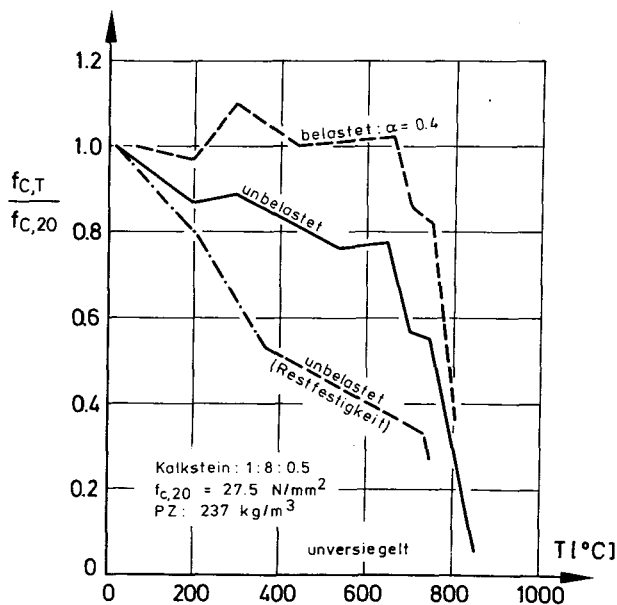


Bild 5.2.3 : Einfluß der Belastung während der Aufheizung auf die Druckfestigkeit von Beton nach /5.2.2./

Fig. 5.2.3 : Influence of the load during heating on the compressive strength of concrete according to /5.2.2./

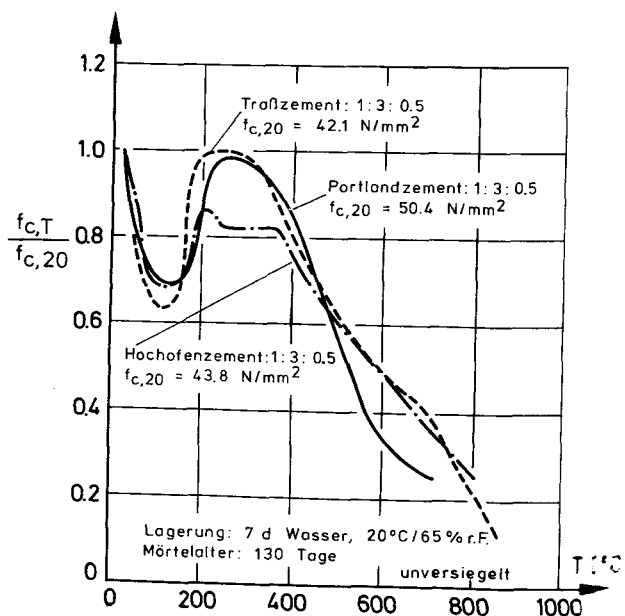


Bild 5.2.4 : Einfluß der Zementart auf der Festigkeitsabfall von Mörtel

Fig. 5.2.4 : Influence of the type of cement on the strength loss of mortars

hängigkeit. Magere Mischungen zeigen vergleichsweise niedrigere Festigkeitsverluste (s.Bild 5.2.1.).

posed to high temperatures. The reduction is being proportionally smaller for lean mixes than for rich mixes (s.fig.5.2.1.).

d) Die Art des Betonzuschlags hat einen deutlichen Einfluß auf die Festigkeits-Temperaturbeziehung. Die Festigkeitsverluste von Betonen mit Kalkstein- und Leichtzuschlag treten verglichen mit Quarzitbeton bei höheren Temperaturen auf. Die Zuschlagart ist offenbar ein wesentlicher Faktor im Hinblick auf die Festigkeitseigenschaften bei hohen Temperaturen (s.Bild 5.2.2.).

d) Different types of aggregates influence the strength-temperature characteristics. The decrease in strength of calcareous and lightweight aggregate concretes occurs at higher temperatures compared to siliceous concretes. The type of aggregate seems to be one of the main factors influencing the high temperature strength (s.fig. 5.2.2.).

e) Die Zementart hat nur geringen Einfluß auf die Festigkeits-Temperaturbeziehung. Der Festigkeitsverlauf von Portlandzementmörtel zeigt bei 500° C einen stärkeren Abfall als Hochofenzement- und Trasszementmörtel.

e) Type of cement has little effect on strength-temperature characteristics. The strength loss of ordinary portland cement mortar indicate a sharper decrease at 500° C compared to blast furnace slag cement and trass cement mortar.

f) Die maximale Korngröße ist ebenfalls nur ein Faktor zweiter Ordnung, wie Untersuchungen an gleichartigen Beton- und Mörtelproben gezeigt haben.

f) Maximum size of aggregate seems to be a second order factor as investigations of mortars and various concretes demonstrate.

g) Eine konstante Belastung (Vorspannung) während der Aufheizperiode hat einen deutlichen Einfluß auf die Festigkeits-Temperaturbeziehung. Es zeigt sich, daß vorbelastete aufgeheizte Proben höhere Festigkeiten erreichen als unbelastete Proben (s.Bild 5.2.3.). Die Beanspruchungshöhe ( $\alpha$ ) während der Aufheizung ist von geringem Einfluß, solange  $\alpha > 0,20$  ist, bei  $\alpha < 0,20$  wird der Einfluß größer.

g) Sustained stress during the heating period influences the shape of the strength-temperature relationship significantly. It is evident, that the "stressed strength" is higher than "unstressed strength" (s. fig. 5.2.3.). The stress level ( $\alpha$ ) itself has little effect on the ultimate strength as long as  $\alpha > 0.20$ , but becomes important if  $\alpha < 0.20$ .

h) Die Aufheizrate hat nur geringen Einfluß solange der Temperaturgradienten in den Proben  $< 10^\circ \text{C/cm}$  sind.

h) Rate of heating has little effect as long as temperature gradients in the test specimens are limited ( $< 10^\circ \text{C/cm}$ ).

i) Die physikalische Zerstörung des Zementsteins beginnt bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen (100°C). Die Festigkeitsverluste werden zunächst jedoch teilweise durch Grenzflächenreaktionen mit den Zuschlägen kompensiert. Dieses gilt vor allen Dingen für Beton und weniger ausgeprägt für Mörtel (s.Bild 5.2.4.).

i) Physical distortion of cement paste starts at relatively low temperatures (100°C). The strength loss is partly compensated by bond reactions between paste and aggregate. This holds especially for concrete but not for mortar (see fig. 5.2.4.).

In Verbindung mit der Entwicklung von Spannbetondruckbehältern (PCRv) wurde die Hochtemperaturfestigkeit von Beton an versiegelten und unversiegelten Betonproben gleichzeitig untersucht. Bei Versiegelung liegen die Versuchstemperaturen durchweg unter 250°C. Man spricht dann auch von hydrothermal beanspruchtem Beton, weil neben der Temperatur gleichzeitig der zugeordnete Satttdampfdruck auf die Probe einwirkt. Aus diesen Versuchen lassen sich in Ergänzung des vorher Gesagten folgende Schlüsse ziehen.

In connection with PCRv design work the high temperature strength of concrete was studied with sealed or unsealed concrete specimens. With sealed specimens normally test temperatures are below 250°C. The procedure is called hydrothermal exposure of concrete, as beside of temperatures the specimens are subjected to the related saturated steam. From those tests in addition to the foregoing statements the following conclusions can be drawn:

- |  |   |
|--|---|
| <p>a) Die <u>Probenversiegelung</u> hat großen Einfluß auf die Druckfestigkeit (s.Bild 5.2.5.).</p>  | <p>a) <u>Sealing of specimens</u> influences the compressive strength significantly (s.fig. 5.2.5.).</p>  |
| <p>b) Die <u>Zuschlagart</u> ist sehr bedeutsam. Versiegelte Proben mit Kalksteinzuschlag zeigen in einigen Fällen Festigkeitsverluste von mehr als 50% bei hydrothermalen Temperatureinwirkung um 200° C. Quarzit- und Basaltbetone sind weniger empfindlich in dem in Frage stehenden Temperaturbereich von 100 bis 250°C (s. Bild 5.2.6. und 5.2.7.).</p> | <p>b) <u>Type of aggregate</u> is of great importance. Sealed specimens with limestone aggregate indicate in some cases more than 50% strength loss under hydrothermal exposure (s.fig.5.2.6.). Quartzite and basalt concretes are less sensitive in the temperature range in question from 100 to 250°C (s.fig. 5.2.7.).</p> |
| <p>c) <u>Flugaschezusätze</u> haben keinen Einfluß bei nicht versiegelten Proben. Sie ermöglichen Festigkeitserhöhungen bei versiegelten Proben /5.2.18./.</p>   | <p>c) <u>Fly ash</u> addition has no effect with unsealed concrete specimens. It causes an increase of strength with sealed specimens.</p>  |
| <p>d) Eine <u>Kompensation der Festigkeitsverluste</u> von hydrothermal beanspruchten Kalksteinbetonen ist durch Flugaschezusätze und Zugabe von silizitischen Feinsandanteilen möglich (s.Bild 5.2.8.).</p>   | <p>d) <u>Compensation</u> of strength loss of limestone aggregate under hydrothermal exposure is possible by fly ash addition or the usage of a small fraction of fine siliceous sand (s.fig. 5.2.8.).</p>  |
| <p>e) Die <u>Zementart</u> hat keinen Einfluß auf die Festigkeit von versiegelten Betonproben bei Temperatureinwirkung.</p>  | <p>e) <u>Type of cement</u> has no effect on the strength of sealed concrete specimens.</p>   |
| <p>f) Das <u>Betonalter</u> hat keinen Einfluß auf die Hochtemperaturfestigkeit, wenn versiegelte Proben, die über 90 Tage alt sind, verwendet werden (s.Bild 5.2.9.).</p>   | <p>f) <u>Age of concrete</u> has no effect on the high temperature strength if sealed specimens older than 90 days are being used (s.fig. 5.2.9.).</p>  |

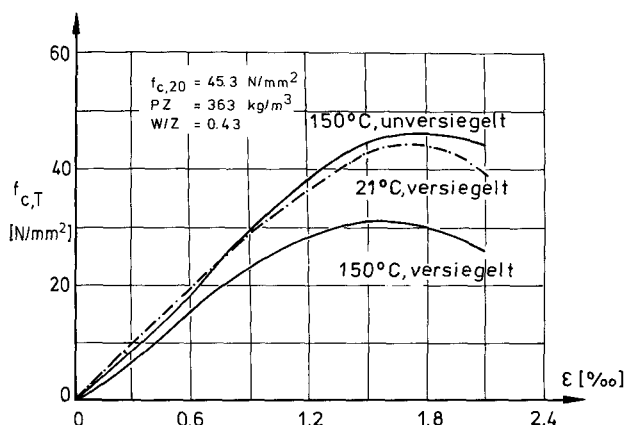


Bild 5.2.5 : Einfluß der Versiegelung auf das Festigkeitsverhalten von Kalksteinbeton nach /5.2.3./

Fig. 5.2.5 : Influence of sealing on the temperature behaviour of limestone concrete according to /5.2.3./

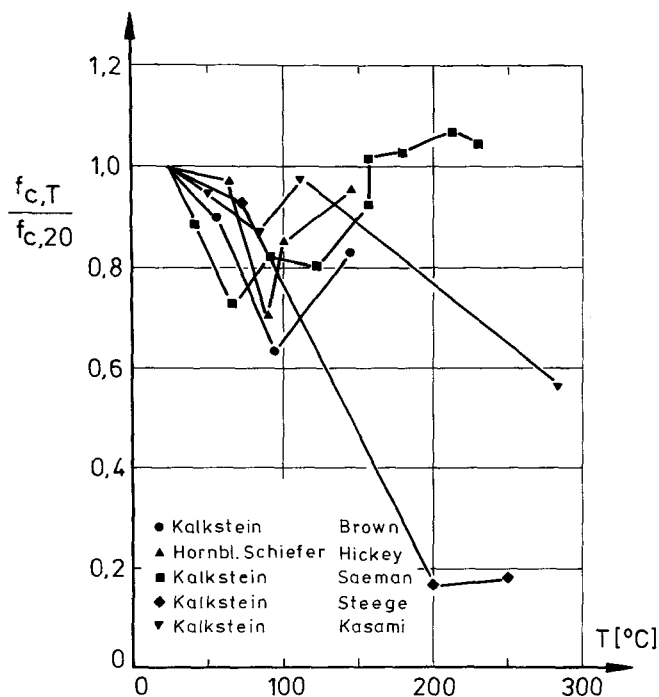


Bild 5.2.6 : Druckfestigkeit von Betonen mit Kalkstein und anderem Zuschlagmaterial

Fig. 5.2.6 : Compressive strength of concretes with limestone and other types of aggregates

g) Eine thermische Dauerbeanspruchung von versiegelten Betonproben kann zu einem ständigen Festigkeitsverlust führen (s. Bild 5.2.10.). Die Ergebnisse von Hilsdorf /5.2.18./ zeigen jedoch, daß der wesentliche Festigkeitsverlust infolge hydrothormaler Prozesse bereits nach einigen Tagen abgeschlossen ist. Eine halblog. Degressionslinie scheint eine realistische Annahme für den zeitabhängigen Festigkeitsabfall zu sein.

g) Continuous heat exposure of sealed concrete specimens may cause a permanent decrease in strength (s.fig.5.2.10.). The results of Hilsdorf /5.2.18./ indicate that the main part of strength losses due to hydrothermal degradation occurs during the first days. A semilog regression line for the time dependent strength loss seems to be an adequate assumption.

h) Zyklische Temperaturbeanspruchungen führen ebenfalls zu zeitabhängigen Festigkeitsverlusten. Der wesentliche Festigkeitsverlust erfolgt im ersten Temperaturzyklus (s.Bild 5.2.11.). Bei versiegelten Kalksteinbetonen wurde bei 150° C nach 14 Zyklen ein Festigkeitsverlust von 50% beobachtet (s. Bild 5.2.12.).

h) Cyclic temperature exposure leads to a continuous decrease of strengths. The main strength loss occurs after the first temperature cycle (s.fig.5.2.11.). With sealed limestone concrete a strength loss of 50% at 150°C was observed after 14 cycles (s.fig. 5.2.12.).

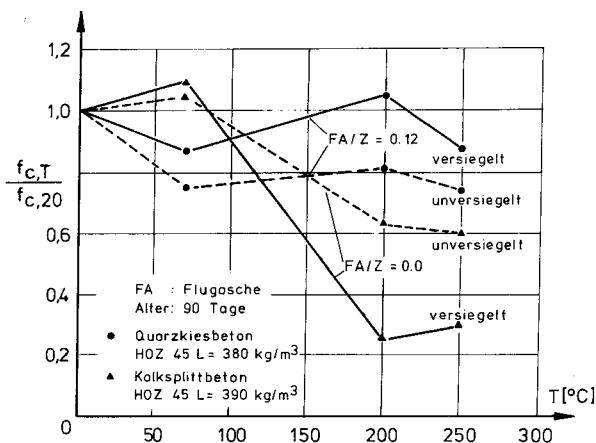


Bild 5.2.7 : Druckfestigkeit von verschiedenen Betonen nach 7 Tagen Temperatureinwirkung im versiegelten und unversiegelten Zustand

Fig. 5.2.7 : Compressive strength of different concretes after 7 days temperature exposure under sealed and unsealed conditions

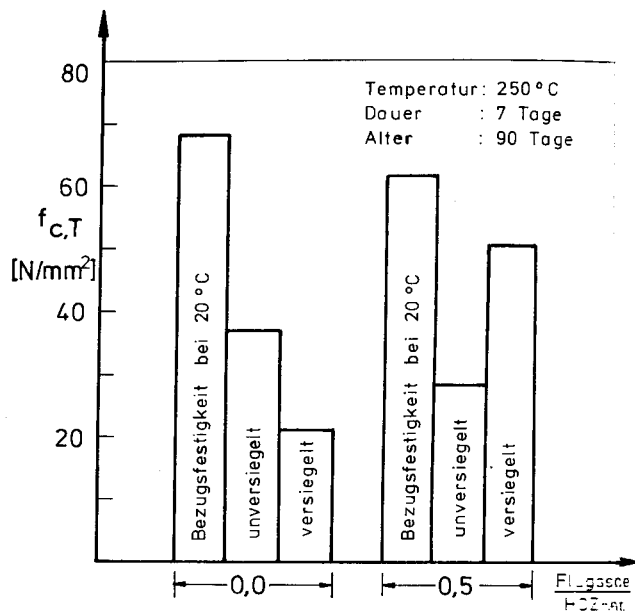


Bild 5.2.8 : Einfluß der Versiegelung und des Flugascheanteils auf die Hochtemperaturfestigkeit von Kalksteinbeton nach /5.2.15/

Fig. 5.2.8 : Influence of sealing and fly ash content on the high temperature strength of limestone concrete according to /5.2.15/

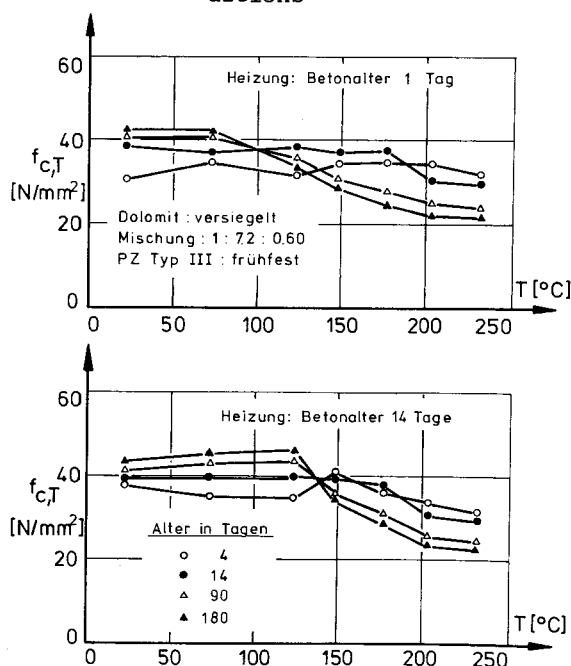


Bild 5.2.9 : Druckfestigkeit von versiegeltem Dolomitbeton nach längerer Temperatureinwirkung nach /5.2.27./

Fig. 5.2.9 : Compressive strength of sealed dolomite concrete after a long term temperature exposure according to /5.2.27./

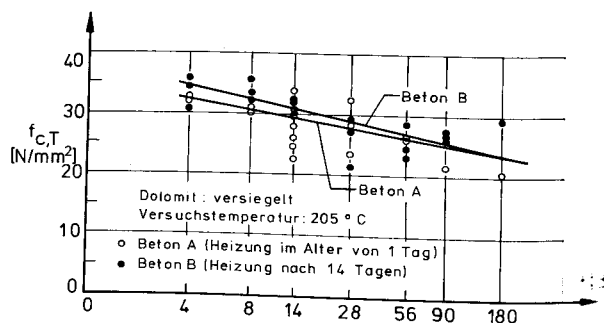


Bild 5.2.10 : Festigkeitsabnahme von versiegeltem Dolomitbeton infolge Temperatureinwirkung (205°C) als Funktion der Beanspruchungsdauer nach /5.2.27./

Fig. 5.2.10 : Strength loss of sealed dolomite concrete due to a temperature exposure (205°C) as a function of the duration of exposure according to /5.2.27./



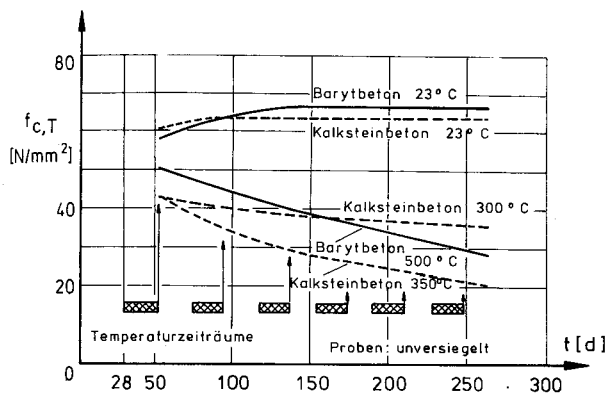


Bild 5.2.11 : Einfluß mehrerer Temperaturzyklen auf die Druckfestigkeit von verschiedenen Betonen nach /5.2.5./

Fig. 5.2.11 : Influence of temperature cycling on the compressive strength of different concretes according to /5.2.5./

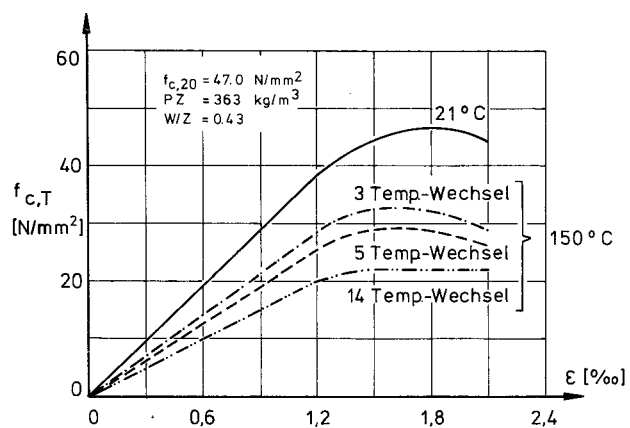


Bild 5.2.12 : Einfluß von Temperaturwechseln auf die Festigkeit von versiegeltem Kalksteinbeton nach /5.2.3./

Fig. 5.2.12 : Influence of temperature cycling on the strength of sealed limestone concrete according to /5.2.3./

## 5.2.2. Literatur Literature

/5.2.1./ Abrams, M.S.: Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 F (871°C). Research and Development Laboratories, PCA, Ser. 1387-1, 1968.

/5.2.2./ Abrams, M.S.: Compressive strength of concrete at elevated temperatures to 1600 F (871°C). Symposium on effects of temperature on concrete, SP-25 American Concrete Institute, pp 33-58, Detroit, 1971.

/5.2.3./ Bertero, V.V., and Polivka, M.: Influence of thermal exposures on mechanical characteristic of concrete. ACI-Int. Sem. on Concrete for Nuclear Reactors, Berlin, ACI-Publications, SP-34, pp 505-531, 1972.

/5.2.4./ Campbell-Allen, D., et al.: An investigation of the effect of elevated temperatures on concrete for reactor vessels. Nucl. Struc. Engng. 2, p.382 ff, 1965.

/5.2.5./ Crispino, E.: Studies on the technology of concretes under thermal conditions. Concrete for Nuclear Reactors, Vol.I, ACI SP-34, No. 25, p. 443 ff, Detroit 1972.

/5.2.6./ Davis, H.S.: Effects of high temperature exposure on concrete. Materials Research & Standards, Vol.7, No.10, October 1966.

/5.2.7./ Davis, H.S.: Aggregates for radiation shielding concrete. Materials Research & Standards, Vol.7, No. 11, pp.494-501, 1967.

- /5.2.8./ Desow, Nekrassow, Milovanow: Cube and prism strength at elevated temperatures. ACI SP 34, No.32, Detroit, 1972.
- /5.2.9./ Dougill, J.W.: The effects of thermal incompatibility and shrinkage on the strength of concrete. Magazine of Concrete Research 13, 39, 119 - 126, 1961.
- /5.2.10./ Grün, R., and H. Beckmann: Verhalten des Betons bei höheren Temperaturen (Behaviour of concrete at high temperatures). Archiv für Eisenhüttenwesen, H.11 (1930), also in: Cement and Cement Manufactures (3), H.3, 1930.
- /5.2.11./ Gurvich, I.E.: About the influence of heating on strength of cements. Cement, N 12, 1938.
- /5.2.12./ Halstaed, P.E.: Discussion of the effect of temperature on the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research (9), No.25, London, 1957.
- /5.2.13./ Harada, T.: Variation of strength and elasticity of concrete under high temperature. Trans.of A.I.J., p. 48, 1954.
- /5.2.14./ Harada, T., J.Takeda, S. Yamane and F. Furumura: Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. ACI Seminar on Concrete for Nuclear Reactors; SP-34, West-Berlin, 1970.
- /5.2.15./ Harada, T.: Thermal character of concrete. Japan, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Neostyled. p. 5 ff, 1962 (private communication).
- /5.2.16./ Harmathy, T.Z., and J.E.Berndt: Hydrated portland cement and lightweight concrete at elevated temperatures. Journal ACI, Title No. 63-4, p. 93 ff, 1966.
- /5.2.17./ Hickey, K.B.: Creep, strength and elasticity of concrete at elevated temperatures. U.S. Bureau of Reclamation, Report. No. C-1257, 1967.
- /5.2.18./ Hilsdorf, H.K., Belli, W., and Seeberger, J.: Strength characteristics of structural concrete in the temperature range 20 to 250°C. 6th SMIRT Conference, paper H1/4, Paris, 1981.
- /5.2.19./ Kordina, K., and N.V.Waubke: Die mechanischen Eigenschaften von Schwerbeton bei hohen Temperaturen (Mechanical properties of concrete at high temperatures). Zeitschrift Materialprüfung 14, Nr. 8, S.239 ff, 1972.
- /5.2.20./ Kordina, K., and U.Schneider: Zum mechanischen Verhalten von Normalbeton unter instationärer Wärmebeanspruchung (Mechanical properties of normal concrete under non-steady and steady state temperature conditions). Sonderdruck aus Beton - Herstellung Verwendung 25, Heft 1, S.19 ff, 1975.
- /5.2.21./ Kordina, K., and U.Schneider: Über das Verhalten von Beton unter hohen Temperaturen (Concerning the behaviour of concrete at high temperatures). Betonwerk + Fertigteil-Technik, 40. Jahrgang, Heft 12, S.572-582, 1975.
- /5.2.22./ Lea, F.C.: The effect of temperature on some of the properties of materials. Engineering 113 2851, 1920.
- /5.2.23./ Lehmann, H., and G.Mälzig: Über die Heißdruckfestigkeit von Beton (Concerning the heat resistance of concrete). Tonindustrie-Zeitung 84, 17, p.414 - 417, 1960.

- /5.2.24./ Maréchal, J.C.: Contribution to the study of thermal and mechanical properties of concrete as a function of temp. (in French). Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Oct. 1970.
- /5.2.25./ Mathieu, H.: Das Verhalten von Beton zwischen 80 und 300°C (Behaviour of concrete between 80 and 300°C). Betontechnische Berichte 1962, p.105 - 108.
- /5.2.26./ Malhotra, H.L.: The effect of temperature on the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research 8, 23, p. 84 ff, 1956 and: Zement-Kalk-Gips (10), H. 7, 1957.
- /5.2.27./ Nasser, K.W., and Lothia, R.P.: Mass concrete properties at high temperatures. Journal ACI, Proceedings, Vol. 68, pp 180-186, 1971.
- /5.2.28./ Nekrassow, K.D.: Influence of high temperatures on the physical and mechanical properties of concrete (in German). In: Fire resistance of prestressed concrete. Proceedings of a symposium organised by the Commission on Fire Resistance of Prestressed Concrete. Braunschweig, 9/11th June 1965. Chairman: K. Kordina. Bauverlag Wiesbaden, pp. 67-74, 1966.
- /5.2.29./ Nishizawa, N., and H.Okamura: Strength and inelastic properties of concrete at elevated temperature. American Concrete Institute SP-34. Detroit, 1972.
- /5.2.30./ Ödeen, K., and A. Nordström: Termiska egenskaper hos betong vid höga temperaturer (Thermal properties of concrete at high temperatures). Cement och Betong 1, Stockholm, 1972.
- /5.2.31./ Schneider, U.: Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen (Kinetic of strength reducing reactions in normal concrete at high temperatures). Dissertation TU Braunschweig, Dec. 1973.
- /5.2.32./ Schneider, U.: Kinetische Untersuchungen an Normalbeton unter thermischer Beanspruchung (Kinetic investigation of normal concrete under thermal stress). Betonwerk- und Fertigteil-Technik, 41.Jahrg., Heft 9, S.445-449, 1975.
- /5.2.33./ Schneider, U.: Über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanisch-technische Auswirkungen (Thermal decomposition of ordinary concrete and its effects on the material properties). Mitteilungsblatt für die amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, 16/17, S.10 - 14, Goslar 1976/77.
- /5.2.34./ Schneider, U., and R. Weiß: Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen (The kinetics of thermal decomposition of ordinary concrete and its effect on concrete strength). Cement and Concrete Research, Vol.7, S.259 - 268, Pergamon Press, 1977.
- /5.2.35./ Schneider, U.: Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton unter stationärer und instationärer Temperaturbeanspruchung (Strength and deformation behaviour of concrete under steady and non-steady temperature influence). Die Bautechnik, Heft 4, p. 123 - 132, 1977.

/5.2.36./ Sullivan, P.J.E., and M.P.Pou-  
cher: The influence of tempera-  
ture on the physical properties  
of concrete and mortar in the  
range of 20°C to 400°C. Symposium  
on effects of temperature on pro-  
perties of concrete, SP-25, pp  
103 - 135, ACI, Detroit, 1971.

/5.2.37./ Waubke, N.V.: Über einen physi-  
kalischen Gesichtspunkt der  
Festigkeitsverluste von Portland-  
zementbetonen bei Temperaturen  
bis 1000°C (Concerning a physi-  
cal viewpoint of strength loss  
of portland cement concrete at  
temperatures up to 1000°C ).  
Schriftenreihe des SFB, Heft 2,  
p. 1 ff, Braunschweig, 1973.

/5.2.38./ Weigler, H., and R. Fischer:  
Über den Einfluß von Temperatu-  
ren über 100°C auf die Druckfe-  
stigkeit von Zementmörtel (Con-  
cerning the influence of tempe-  
rature above 100°C on the com-  
pressive strength of cement mor-  
tar). beton 18, Heft 2, p.33 -  
46, 1968.

/5.2.39./ Weigler, H., and R. Fischer:  
Beton bei Temperaturen von 100 bis  
750° C (Concrete at temperate  
of 100 - 750°C). Beiträge zum  
Massivbau, Mehmel-Festschrift,  
Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf  
S. 87 - 103, 1967.

/5.2.40./ Woolson, I.H.: Brandversuche -  
Druckfestigkeit und Elastizitäts-  
modul von Beton (Fire tests -  
compressive strength and elasti-  
city modulus of concrete). Pro-  
ceedings ASTM, Vol.5, p. 335 f,  
1905.

/5.2.41./ Zoldners, N.G.: Thermal proper-  
ties of concrete under sustained  
elevated temperatures. Symposium  
on effects of temperature on con-  
crete, SP-25, pp 1- 31, ACI, De-  
troit, 1971.

/5.2.42./ Zoldners, N.G.: Effect of high  
temperature on concrete incorpo-  
rating different aggregates. De-  
part.of Mines and Techn. Surves,  
Mines Branch Des.Rep. R 64,  
Ottawa, 1960.

### 5.3. Elastizitätsmodul

#### 5.3.1. Versuchsergebnisse

Eine begrenzte Anzahl von Publikationen be-  
handelt die elastischen Eigenschaften von  
Beton bei hohen Temperaturen (vergl. Ab-  
schnitt 5.3.2.). Wesentliche Versuchser-  
gebnisse sind auf den Bildern 5.3.1. bis  
5.3.6. angegeben. Die meisten Versuchser-  
gebnisse beziehen sich auf Versuche mit un-  
versiegelten Proben. Über Ergebnisse aus dyn-  
amischen Versuchen gibt es nur wenig Daten.  
Die folgenden wesentlichen Parameter wurden  
bislang untersucht:

- Mischungsverhältnis,
- Art des Zuschlags,
- Art des Zements,
- Versuchsbedingung (statische und dyna-  
mische Versuche z.B.).

### 5.3. Modulus of elasticity

#### 5.3.1. Test results

A limited number of publications consider  
the elastic properties of concrete at high  
temperatures (comp.Section 5.3.2.). Essen-  
tial results are summarized in figs.5.3.1.  
to 5.3.6.. Most test results relate to sta-  
tic tests as described in figs. 4.2. and  
4.3.. There is little available data from  
dynamic tests. A small number of test re-  
sults were obtained from beam tests. The  
following main features have been investi-  
gated:

- mix proportion,
- type of aggregate,
- cement type,
- test condition (static or dynamic tests  
e.g.).

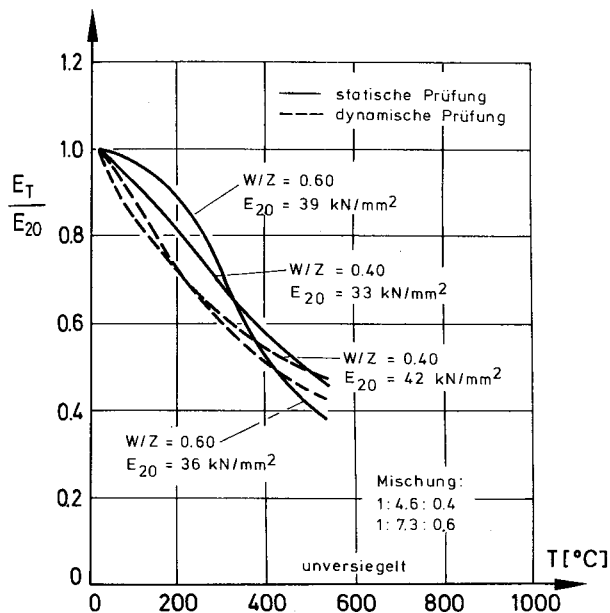


Bild 5.3.1 : Einfluß der Versuchsmethode und des W/Z-Wertes auf den E-Modul von Beton nach /5.3.4./

Fig. 5.3.1 : Influence of the test method and the water/cement ratio on the elasticity of concrete according to /5.3.4./

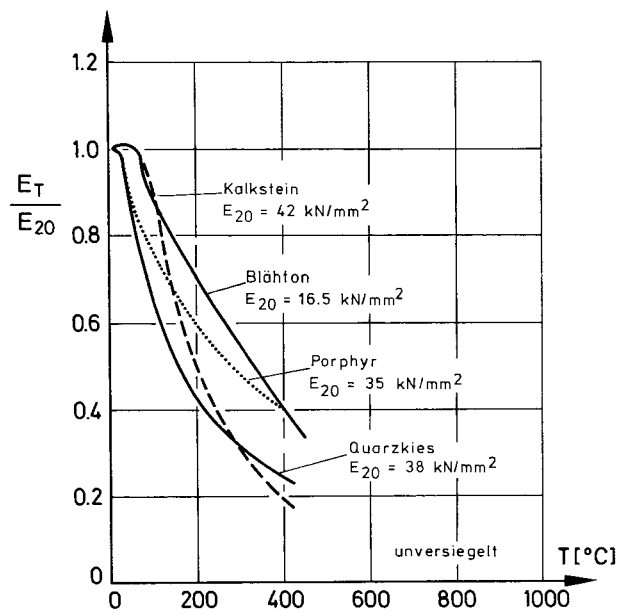


Bild 5.3.2 : Einfluß des Zuschlags auf den E-Modul nach /5.3.9./

Fig. 5.3.2 : Influence of the type of aggregate on the modulus of elasticity according to /5.3.9./

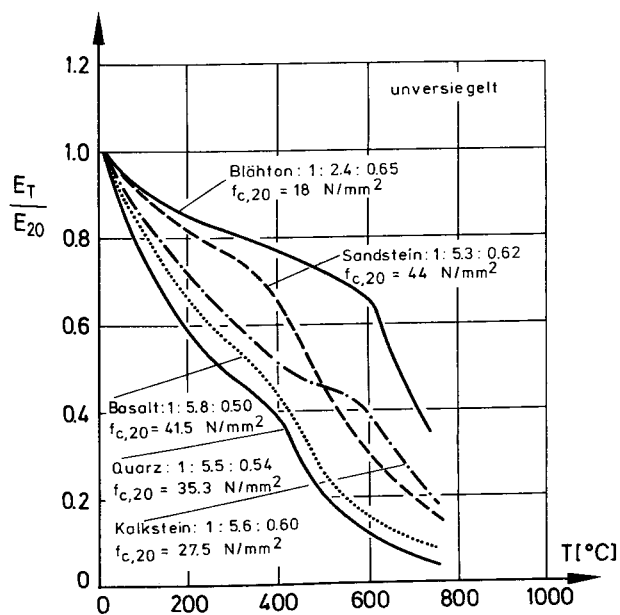


Bild 5.3.3 : Einfluß des Zuschlags und der Betonfestigkeit auf den E-Modul

Fig. 5.3.3 : Influence of the type of aggregate and the original strength of the concrete on the modulus of elasticity

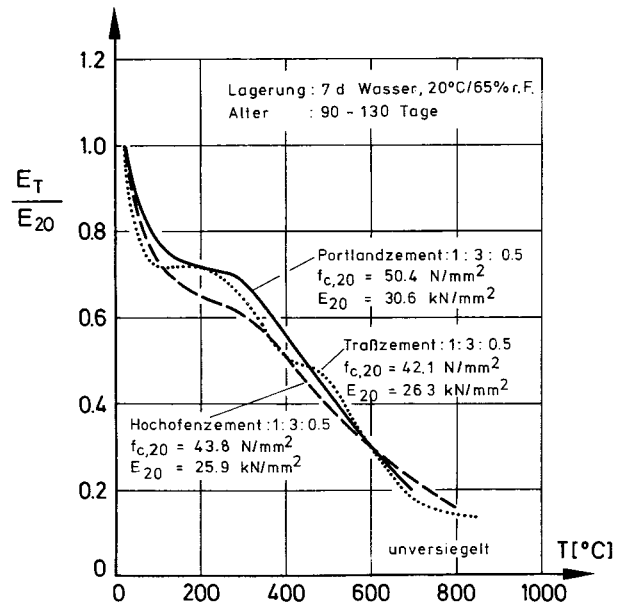


Bild 5.3.4 : Einfluß der Zementart auf den E-Modul von Zementmörteln

Fig. 5.3.4 : Influence of the type of cement on the modulus of elasticity of cement mortars

Aus den vorliegenden Daten lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

From the present data it can be stated:

- a) Die Ausgangsfestigkeit des Betons hat wenig Einfluß auf die E-Modul-Temperaturbeziehung.
- b) Der Wasser/Zement-Wert hat im Rahmen üblicher Werte kaum Einfluß auf die E-Modul-Temperaturbeziehung. Dynamische Versuche ergeben i.a. größere Temperaturabminderungen als statische Versuche (s. Bild 5.3.1.).
- c) Die Zuschlagart hat in den meisten Fällen einen großen Einfluß. Betone mit Leichtzuschlägen ergeben durchweg die niedrigsten, Betone mit harten Quarzitzuschlägen ergeben die höchsten Temperaturabminderungen beim E-Modul. Die Ergebnisse der einzelnen Autoren variieren jedoch erheblich (vergl. Bild 5.3.2. und 5.3.3.). Kalksteinbetone zeigen geringere Verluste als Quarzitbetone.
- d) Die Zementart ist von geringerem Einfluß (s. Bild 5.3.4.). Zwischen 100 und 300°C zeigen Hochofenzementmörtel etwas geringere E-Moduln als Portlandzementmörtel.
- e) Eine konstante Belastung (Vorspannung) während der Aufheizung ist von großem Einfluß auf die E-Modul-Temperaturbeziehung. Vorbelastete Proben haben immer höhere Elastizitätsmoduln als unbelastete Proben. Die Beanspruchungshöhe ist dagegen von geringerem Einfluß solange  $\alpha = 0.1$  bis  $0.3$  ist.
- f) Probenversiegelung hat keinen deutlichen Einfluß auf die E-Modul-Temperaturbeziehung im Rahmen der festgestellten Streuungen in den vorliegenden Werten (s. Bild 5.3.5.).
- g) Die Dauer der Temperatureinwirkung hat keinen nachweisbaren Einfluß.
- h) Die thermisch bedingten Festigkeitsminderungen sind durchweg geringer als die Minderungen im E-Modul, zumindest bis zu Temperaturen von 400°C.

- a) Original strength of concrete seems to have little influence on the elasticity-temperature relationship.
- b) Water/cement ratio within the range which is normally used in concrete hardly influences the elasticity-temperature relationship. Dynamic tests indicate higher temperature reductions than static tests (s. fig. 5.3.1.).
- c) Type of aggregate has in most cases a strong influence. Lightweight aggregate concretes indicate the lowest decrease in the modulus of elasticity and siliceous concretes the highest. The range of data from different workers varies significantly (comp. fig. 5.3.2. and 5.3.3.). Concrete with limestone aggregate indicates less losses compared to quartzite concrete.
- d) Type of cement has little effect on modulus of elasticity-temperature characteristics (s. fig. 5.3.4.). From 100 to 300°C blast furnace slag cement mortars indicate somewhat lower levels of the modulus elasticity compared to PP mortars.
- e) Sustained stress during heating the test specimen significantly affects the elasticity-temperature behaviour. "Stressed elasticities" are always higher than "unstressed elasticities". The stress level itself has a little effect within a range of  $\alpha = 0.1$  to  $0.3$ .
- f) Sealing of specimens has no significant effect on the temperature dependence within the range of scatter of data (s. fig. 5.3.5.).
- g) Duration of temperature exposure is not important.
- h) The temperature loss of strength is somewhat lower than the temperature loss of the modulus of elasticity up to 400°C.

i) Daten über Poissonzahlen liegen von zwei Forschern vor (s.Bild 5.3.6.). Sie wurden unter etwa vergleichbaren Bedingungen ermittelt. Die Ergebnisse widersprechen sich.\*)

i) Data on Poisson's ratio have been published from two workers (s.fig.5.3.6.). These data have been obtained by similar test methods. The results contrast greatly.+)

\*) Anmerkung des Autors: Biaxial- oder Triaxial-Temperatur-Versuche sind erforderlich, um ein genaueres Bild über das Hochtemperaturverhalten von Beton unter mehraxialer Beanspruchung zu gewinnen.

+) Author's note: Biaxial or triaxial high temperature tests and investigations are needed to get a somewhat clearer idea of the material behaviour under multi-axial stress states.

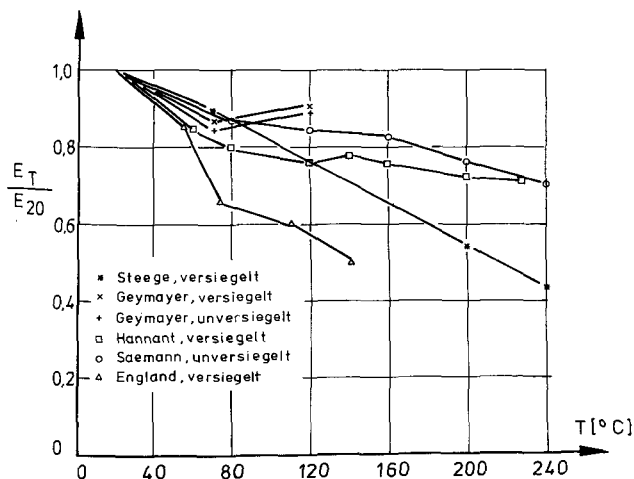


Bild 5.3.5 : Einfluß der Versiegelung auf den E-Modul verschiedener Kalksteinbetone

Fig. 5.3.5 : Influence of sealing on the modulus of elasticity of different limestone concretes

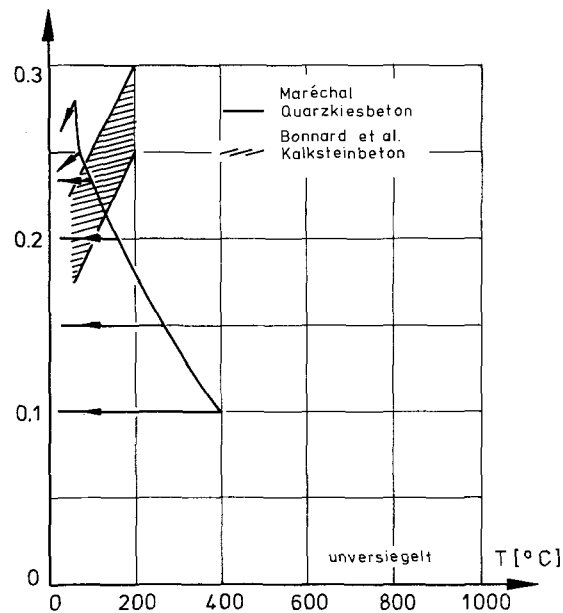


Bild 5.3.6 : Poissonzahl von Normalbetonen nach verschiedenen Autoren

Fig. 5.3.6 : Poisson's ratio of normal concretes according to different authors

5.3.2.      Literatur \*)                      Literature \*)

- |   |  |
|---|--|
| <p>/5.3.1./ Anonymous: Variation of strength and elasticity of concrete under high temperatures. Part III; Natural recovery of strength and elasticity. Trans. Arch. Inst. of Japan, No. 56, p. 1 ff, 1957.</p> <p>/5.3.2./ Bonnard, M., and Gardel, M.: Verhalten des warmen Betons (Behaviour of hot concrete). Schlußbericht, Institut de Statique des Constructions, Lausanne, 1980.</p> <p>/5.3.3./ Cruz, C.R.: An optical method for determining the elastic constants of concrete. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol.4, No.2, p.24 ff, 1962.</p> <p>/5.3.4./ Cruz, C.R.: Elastic properties of concrete at high temperatures. J. PCA Research and Development Laboratories, Vol.8, No.1, p.37 ff, 1966.</p> <p>/5.3.5./ England, G.L.: A study of the time dependant strains in concrete maintained at elevated temperatures. Thesis University of London, 1961.</p> <p>/5.3.6./ Furumura, F.: Strengths and elasticities of concretes at elevated temperatures. Int.Sem. on Concrete for Nuclear Reactors, Berlin, 1970.</p> <p>/5.3.7./ Geymayer, H.G.: Der Einfluß erhöhter Temperaturen auf das Formänderungsverhalten von Beton (Influence of high temperatures on the deformation characteristics of concrete). Zement und Beton, Heft 63/64, Aug./Sept. 1972.</p> | <p>/5.3.8./ Hannant, D.J.: The strain behaviour of concrete under compressive stress at elevated temperatures. Central Electr. Res. Lab. Laboratoire Note RD/L/N/67-66, June 1966.</p> <p>/5.3.9./ Maréchal, J.C.: Variations in the modulus of elasticity and poisson's ratio with temperature. XI Int. Seminar on CNR, Berlin, 1970.</p> <p>/5.3.10./ Saemann, J.C., and Washa, G.W.: Variation of mortar and concrete properties with temperatures. Journal ACI, No. 54-20, pp. 385-395, 1957.</p> <p>/5.3.11./ Salmanov, G.D., and A.F.Milovanov: Influence of high temperature on elastic-plastic properties of ordinary and heat resistance concretes and its bond with reinforcement. Building industry, No. 1, 1952.</p> <p>/5.3.12./ Schneider, U.; Diederichs, U.; Rosenberger, W., and R. Weiß: Hochtemperaturverhalten von Festbeton (High temperature behavior of concrete), Sonderforschungsbericht 148, Arbeitsbericht 1978 - 1980, Teil II, S.B3 1-142, Technical University Braunschweig, 1980.</p> <p>/5.3.13./ Steege, H.: HHT - Demo Betonversuchsprogramme (HHT-Demo Concrete Research Program) Abschlußbericht, HRB GmbH, Mannheim 1981 (unpublished).</p> |
|---|--|

---

\*) Anmerkung : Weitere Literatur hierzu ist in Abschnitt 5.2.1. zu finden.

Author's note: Further literature can be found in Section 5.2.1.



#### 5.4. Spannungs - Dehnungs - Beziehung

##### 5.4.1. Versuchsergebnisse

Unter der Überschrift 'Spannungs-Dehnungs-Beziehung' werden verschiedene Hochtemperatüreigenschaften von Beton detailliert behandelt. Die behandelten Versuchsdaten beziehen sich auf stationäre Kurzzeitversuche gemäß Bild 4.1.. Die zugehörigen Versuchsmethoden sind im Abschnitt 4.2. beschrieben (s. Bild 4.2. und 4.3.). Wesentliche Versuchsergebnisse und -daten sind auf den Bildern 5.4.1. bis 5.4.6. zusammengestellt. Eine Diskussion der Ergebnisse wird im folgenden vorgenommen.

Die meisten der vorliegenden  $\sigma - \epsilon$ -Versuche wurden lastgesteuert durchgeführt, woraus sich Angaben über die Druckfestigkeit, den E-Modul und die Bruchdehnung gewinnen lassen (s. Bild 5.4.1.). Aufgrund der fortgeschrittenen Entwicklung servohydraulisch gesteuerter Prüfmaschinen können nunmehr jedoch auch dehnungsgesteuerte Versuche bei hohen Temperaturen durchgeführt werden. Solche Versuche ergeben  $\sigma - \epsilon$ -Kurven wie sie auf den Bildern 5.4.2. und 5.4.3. dargestellt sind. Im dehnungsgesteuerten Versuch wird die vollständige  $\sigma - \epsilon$ -Beziehung gemessen, d.h. auch der abfallende Zweig im Spannungsdiagramm wird erfaßt. Somit ergibt sich die zusätzliche Möglichkeit, die sogenannte Bruch- bzw. Dissipationsenergie der Probe zu bestimmen. Beide Versuchsorten sind vielfach angewandt worden, wobei die folgenden Parameter studiert wurden:

- Mischungsverhältnis,
- Zuschlagart,
- Zementart,
- Stahlfaserzugabe,
- Lagerungsbedingungen,
- Versuchsbedingungen (z.B. Belastung während der Aufheizung).

#### 5.4. Stress - strain relationship

##### 5.4.1. Test results

Under the heading "stress - strain relationship" detailed information on the effect of elevated temperatures on different mechanical behaviour of concrete is given. The data presented apply to the short term steady state test methods shown in fig.4.1.. The individual test methods and data which can be derived from the different tests have been described in chapter 4.2. (see fig. 4.2. and 4.3.). A survey of the most important test results is indicated in figs. 5.4.1. to 5.4.6.. A brief discussion on the main findings of the investigations is given below.

Most tests of this type have been performed as stress-rate controlled tests. From these tests stress-strain characteristics are obtained which include the modulus of elasticity, the compressive strength and the ultimate strain at failure (see fig. 5.4.1.). With recent developments in the field of modern hydraulic test equipment it is now possible to perform strain-rate controlled tests, too. Those tests yield  $\sigma - \epsilon$ -curves as indicated in fig. 5.4.2. and 5.4.3.. Strain rate-controlled tests enable the complete  $\sigma - \epsilon$ -relationship of the material to be measured e.g. the decreasing stresses beyond the stress maximum are continuously recorded and it is therefore possible to determine the total mechanical dissipated energy by the specimen during the test. Both types of tests have been employed extensively to investigate the following main features:

- mix proportion,
- type of cement,
- type of aggregate,
- steel fiber addition,
- curing conditions,
- test condition (e.g. loaded during heating).

Aus den Bildern 5.4.1. bis 5.4.6. und der durchgesehenen Literatur sind folgende Schlüsse zu ziehen:

- a) Die Ausgangsfestigkeit hat wenig Einfluß auf die Form der  $\sigma - \epsilon$ -Beziehung.
- b) Der Wasser/Zement Wert hat im Bereich herkömmlicher Werte kaum Einfluß auf die  $\sigma - \epsilon$ -Beziehung.
- c) Das Zuschlag-Zement-Verhältnis hat Einfluß auf den E-Modul und somit auch auf die Anfangssteigung der  $\sigma - \epsilon$ -Beziehung. Mörtel (hoher Zementanteil!) zeigen geringere Anfangssteigungen als Beton. Die  $\sigma - \epsilon$ -Beziehung von Beton ist stärker gekrümmt als von Mörtel.
- d) Die Zuschlagart ist ein wesentlicher Faktor. Betone mit harten Zuschlägen (Quarz, Basalt) zeigen einen stärkeren Abfall in der Anfangssteigung der  $\sigma - \epsilon$ -Kurven bei steigender Temperatur als weiche Zuschläge (Leichtzuschlag). Konstruktionsleichtbetone zeigen kaum Veränderungen ihrer  $\sigma - \epsilon$ -Beziehung bis 300°C. Demgegenüber weisen Normalbetone mit harten Zuschlägen (geringe Porosität!) schon bei kleinen Temperaturanstiegen deutlich Verringerungen in den Anfangssteigungen der  $\sigma - \epsilon$ -Kurven auf. Die Bruchdehnung - das ist die Dehnung am Bruchpunkt bzw. am Spannungsmaximum der  $\sigma - \epsilon$ -Kurve - ist demgegenüber nahezu unabhängig von der Zuschlagart (s. Bild 5.4.4.).
- e) Die Bruchenergie, d.h. das Spannungs-Dehnungs-Integral im dehnungsgesteuerten Versuch, zeigt zwischen 300 und 600°C ein Maximum. Die Werte der Bruchenergie liegen bei niedrigen und hohen Temperaturen zwischen 30 und 70 J/kg. Maximalwerte von 60 bis 100 J/kg wurden im mittleren Temperaturbereich von 300 bis 600°C gefunden. Betone mit harten Zuschlägen erreichen durchweg niedrigere Bruchenergien als Betone mit weichen Zuschlägen (s. Bild 5.4.5.).

From the figures 5.4.1. to 5.4.6. and the literature reviewed the following conclusions can be drawn:

- a) Original strength has only little effect on the shape of  $\sigma - \epsilon$ -curves.
- b) Water cement ratio within the practical range of concrete application hardly influences the shape of  $\sigma - \epsilon$ -curves.
- c) Aggregate cement ratio has a significant effect on the modulus of elasticity and consequently also on the initial slope of the  $\sigma - \epsilon$ -curves.  $\sigma - \epsilon$ -curves of mortars (high cement content!) indicate a lower initial slope than normal concretes.  $\sigma - \epsilon$ -curves of concrete indicate a somewhat greater curvature than those of mortars.
- d) Type of aggregate is the main factor affecting the shape of the  $\sigma - \epsilon$ -curves. Concretes made with hard aggregates (siliceous, basaltic) generally have a steeper decrease of the initial slope due to higher test temperatures than softer aggregates (e.g. lightweight aggregates). Lightweight concretes indicate practically no significant changes in the shape of the  $\sigma - \epsilon$ -curves for temperatures up to about 300° C. However, concrete made from hard aggregates with negligible porosity already show at relative low temperatures, a decrease in the initial slope of the  $\sigma - \epsilon$ -curves. The ultimate strain (strain at the failure point or maximum point of  $\sigma - \epsilon$ -curves) turns out to be nearly independent of the type of aggregate (see fig. 5.4.4.).
- e) The dissipation energy (i.e. work of rupture in a strain-rate controlled compressive test) indicates a maximum in the temperature region of 300 to 600° C. The value of the ultimate dissipation energy for the low and high temperature regions lies between 30 and 70 J/kg. Maximum values from 60 to 100 J/kg have been found in the medium temperature region from 300 to 600° C. Concretes made with hard aggregate usually indicate lower dissipation energies than concretes made with softer aggregates (s. fig. 5.4.5.).

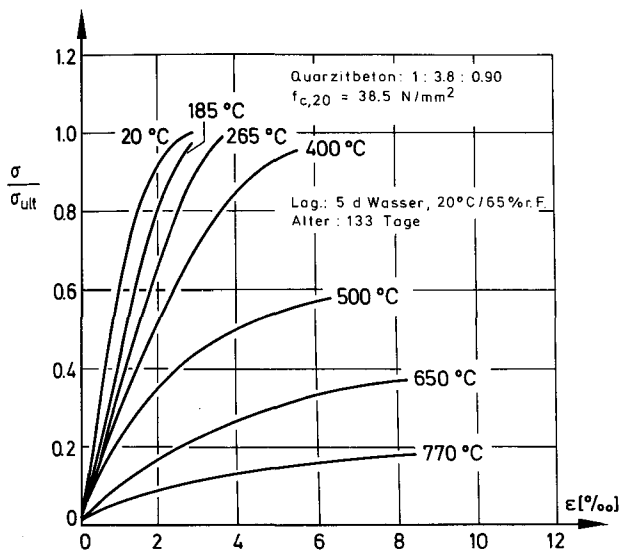


Bild 5.4.1 : Spannungs- Dehnungs-Beziehung von Normalbeton im lastge- steuerten Versuch nach /5.4.1./

Fig. 5.4.1 : Stress-strain relationship of normal concrete in a stress rate controlled test according to /5.4.1./

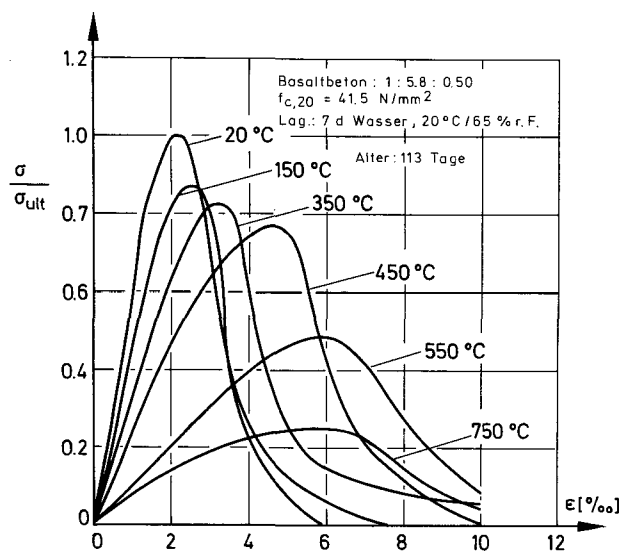


Bild 5.4.2 : Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Normalbeton im dehnungsge- steuerten Versuch

Fig. 5.4.2 : Stress-strain relationship of normal concrete in a strain rate controlled test

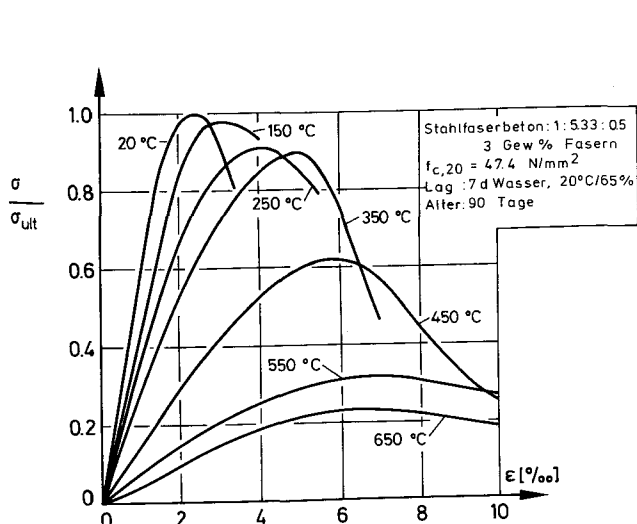


Bild 5.4.3 :  $\sigma$ -  $\epsilon$ -Beziehung von Beton mit Stahlfaserzusätzen im dehnungsgesteuerten Versuch

Fig. 5.4.3 :  $\sigma$ -  $\epsilon$ - curves of concrete with steel fibre additions in a strain rate controlled test

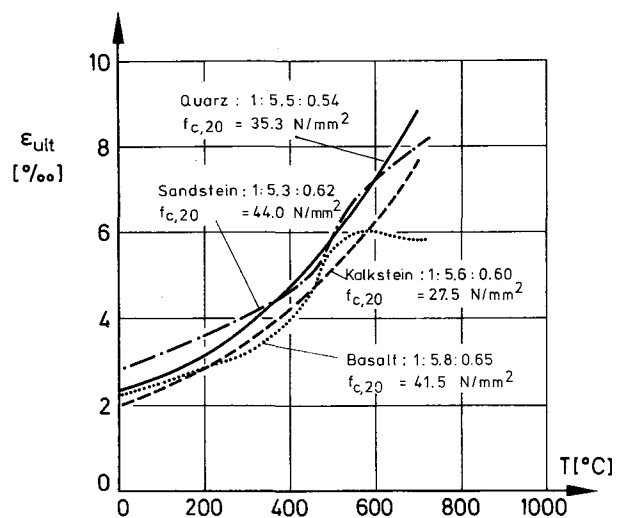


Bild 5.4.4 : Bruchdehnung von Betonen mit verschiedenen Zuschlagstoffen

Fig. 5.4.4 : Ultimate strain of normal concrete with different types of aggregate

- f) Die Zementart scheint bei Beton von geringem Einfluß zu sein. Mörtelproben (Mischung: 1 : 3 : 0,5) aus verschiedenen Zementen ergaben jedoch deutlich unterschiedliche Werte. HOZ-Mörtel ergaben nahezu streng lineare Anfangssteigungen in ihren  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen. PZ-Mörtel zeigten dagegen auch schon bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen eine degressive Abnahme in der Linearität. Das Verhalten von Trass-Mörtel (Trass: 70% PZ + 30% Vulkanasche) ähnelt dem der PZ-Mörtel. Insgesamt scheint er jedoch etwas duktiler als PZ-Mörtel und HOZ-Mörtel zu sein.
- g) Stahlfaserzusätze (s. Bild 5.4.3.) haben einen deutlichen Einfluß auf die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen. Bei Temperaturen oberhalb 450°C wurde ein rapider Rückgang in der Druckfestigkeit und der Bruchenergie festgestellt.
- h) Die Lagerungsbedingungen beeinflussen die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehung solange  $T < 300^\circ\text{C}$  ist. Üblicherweise sind die Anfangssteigungen und Druckfestigkeiten von wassergelagerten Proben geringer als von an Luft gelagerten oder bei vorgetrockneten Proben. In den meisten Fällen sind die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen jedoch normalisiert, d.h. die Spannungswerte sind auf die Ausgangsfestigkeit bei 20°C bezogen ( $\sigma_{\text{ult}, 20^\circ\text{C}} = 1.0$ ), so daß der Lagerungseinfluß nicht mehr deutlich wird. Sofern wassergelagerte Proben als Referenzproben dienen, kann man gelegentlich Festigkeitsanstiege nach einer mäßigen Temperatureinwirkung beobachten.
- i) Die Versuchsbedingungen sind ebenfalls ein wichtiger Faktor. Eine ständige Belastung der Probe während der Aufheizung verändert die Form der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehung deutlich, wobei die Art des untersuchten Betons von Einfluß ist. Vorbelastete Proben zeigen eine deutliche Festigkeits- und Elastizitätszunahme im Vergleich zu unbelastet aufgeheizten Proben. Die Bruchdehnung der belasteten Proben nimmt dagegen deutlich ab. Bis zu Temperaturen von 350°C verhalten sich die belasteten
- f) Type of cement seems to be of minor influence as far as concretes are considered. Mortars (mix proportion 1 : 3 : 0,5) made with different types of cement show significant differences. Blast furnace slag cement mortars show a nearly linear initial slope of the  $\sigma$ - $\epsilon$ -curves. Portland cement mortars on the other hand, already show at relative low temperatures a transition from a linear slope to a more degressive curvature of the  $\sigma$ - $\epsilon$ -curves. The behaviour of trass cement mortars (trass cement: 70 % portland cement + 30 % pozzolanic ash) is similar to portland cement mortars. On the whole trass cement mortar seems to be somewhat more ductile than portland cement and blast furnace slag cement mortar. The latter indicated a more brittle fracture.
- g) Addition of steel fibers (see fig. 5.4.3.) has a significant influence on the shape of the  $\sigma$ - $\epsilon$ -curves. At temperatures higher than 450°C a rapid decrease in strength and dissipation energy was observed.
- h) Curing conditions influence the stress-strain behaviour at relative low temperatures ( $< 300^\circ\text{C}$ ). Usually the initial slopes of the  $\sigma$ - $\epsilon$ -curves and stress maxima are lower for specimens cured under water than for dried or air cured specimens. However, in most cases the  $\sigma$ - $\epsilon$ -relationships are normalized to the ultimate strength at 20°C ( $\sigma_{\text{ult}, 20^\circ\text{C}} = 1$ ). Sometimes by this means an apparent rise of the high temperature values of the compressive strength occurs if water cured specimens are taken into consideration.
- i) Test condition itself is an important factor too. A sustained load during heating varies the shape of the  $\sigma$ - $\epsilon$ -curve significantly which is independent of the type of concrete being tested. Specimens under a sustained load during the heating period indicate a significant increase of compressive strength and modulus of elasticity compared to specimens which were not loaded during heating but tested

Proben ähnlich wie nicht beheizte Proben, d.h. die  $\sigma - \epsilon$ -Kurven sind nahezu temperaturunabhängig. Die Belastungshöhe während der Aufheizung scheint nur von geringem Einfluß zu sein (s.Bild 5.4.6.).

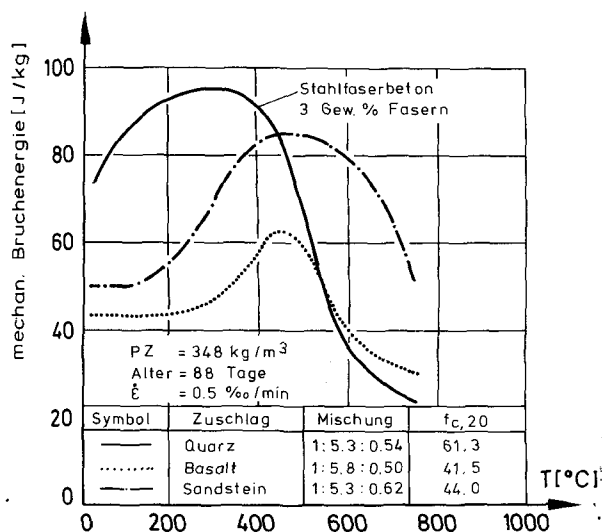


Bild 5.4.5 : Bruchenergie von Normalbetonen mit und ohne Stahlfaserzusätzen

Fig. 5.4.5 : Dissipation energy of normal concretes with and without steel fibre addition

under the same conditions. The ultimate strain is also significantly reduced with loaded specimens. Up to test temperatures of about 350° C concrete specimens indicated similar behaviour to unheated specimens. The  $\sigma - \epsilon$ - curves are nearly independent of the test temperature. The load level during heating itself seems to have minor influence (s.fig.5.4.6.).

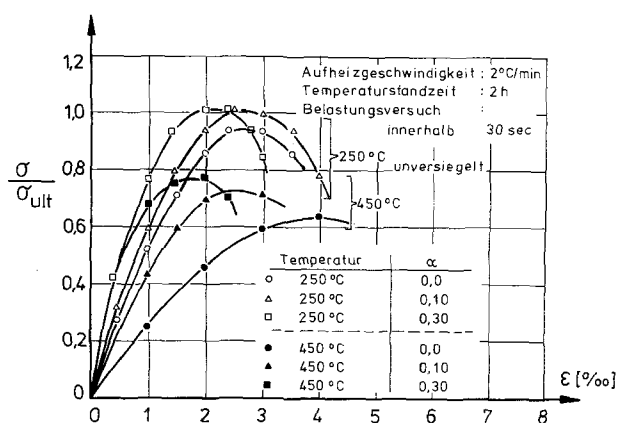


Bild 5.4.6 : Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Normalbeton bei Vorbelastung der Proben während des Aufheizens

Fig. 5.4.6 : Stress-strain relationship of normal concrete with specimens being loaded during the heating period

#### 5.4.2. Literatur<sup>\*)</sup> Literature<sup>\*)</sup>

/5.4.1./ Anderberg, Y., and S. Thelandersson: Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures, 1.General discussion and critical review of literature. Lund Institute of Technology, Lund Sweden, Bulletin 34, 1973.

/5.4.2./ Baldwin, R., and M.A. North: A stress-strain relationship for concrete at high temperatures. Mag. Concrete Res., 25 (85), 208-212, 1973.

/5.4.3./ Baldwin, R., and M.A. North: Stress-strain curves of concrete

at high temperatures - a review.  
F.R.S. Fire Research Note No.785,  
1969.

/5.4.4./ Furamura, F.: The stress-strain curve of concrete at high temperature. Tokyo Institute of Technology, Report of Meeting at Architectural Institute of Japan, 1966.

/5.4.5./ Furamura, F.: Stress - strain relationship in compression of concrete at high temperatures. Trans. Architect. Inst. Tokyo, No. 174, 1970.

/5.4.6./ Schneider, U., Diederichs, U., and Weiß, R.: The causes of strength loss of concrete at high temperatures (in German). Bauphysik, Heft 3, pp. 104-109 Berlin, June 1980.

---

\*) Anmerkung : Weitere Literatur hierzu ist in Abschnitt 5.2.2. zu finden.

Author's note: Further literature can be found in Section 5.5.2.

## 5.5. Kriechen, Relaxation und Schwinden

### 5.5.1. Stationäre Versuche bei $T > 150^{\circ}\text{C}$

Stationäre Kriechversuche an Beton wurden vielfach angeführt. Die Versuchstemperaturen sind dabei jedoch im allgemeinen auf unter  $150^{\circ}\text{C}$  begrenzt worden, weil die Messungen in Verbindung mit der Entwicklung von Spannbetondruckbehältern standen. Solche Messungen sind im zweiten Teil dieses Abschnittes beschrieben. Zunächst wurden Kriechuntersuchungen, die bei Temperaturen oberhalb  $150^{\circ}\text{C}$  durchgeführt wurden, behandelt.

Während eines isothermen Kriechprozesses treten die folgenden Verformungen auf (s. Bild 5.5.1.):

- elastische Verformungen infolge der Belastung,
- Schwindverformungen infolge Feuchteabgabe und Karbonatisierung,
- Grundkriechverformungen (sofern die Feuchteabgabe verhindert wird),
- Trocknungskriechverformungen (sofern die Feuchteabgabe nicht verhindert wird).

## 5.5. Creep, relaxation and shrinkage

### 5.5.1. Steady state tests at $T > 150^{\circ}\text{C}$

Many steady state creep tests have been carried out on concrete. The test temperatures were generally limited to below  $150^{\circ}\text{C}$  in studies of the implication of creep on prestressed concrete reactor vessels. These measurements are discussed in the second part of this section. At first creep measurements at temperatures higher than  $150^{\circ}\text{C}$  will be looked at.

During an isothermal creep test the following types of deformations occur (s.fig. 5.5.1.):

- elastic deformations due to the external load,
- shrinkage due to moisture losses and carbonization effects,
- basic creep strains (if the moisture loss is prevented),
- drying creep strains (if the moisture loss is not prevented).

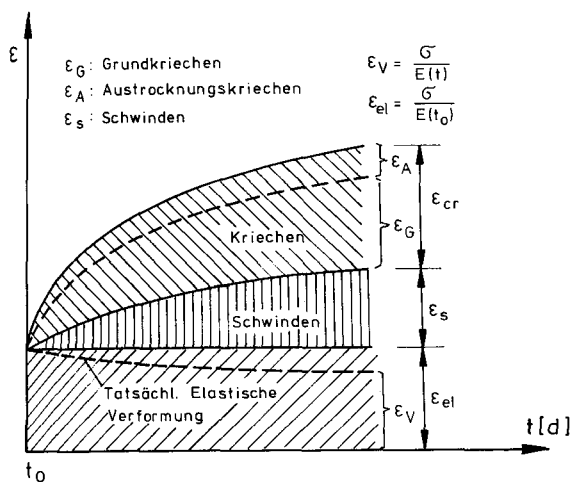


Bild 5.5.1 : Formänderungen von Beton unter konstanter Belastung

Fig. 5.5.1 : Deformations of concrete subjected to a constant load

Bei Temperaturen deutlich über 100° C kann die Feuchteabgabe nicht zuverlässig verhindert werden. Deshalb werden Kriechversuche bei solchen Temperaturen vorzugsweise mit nicht versiegelten Betonproben durchgeführt. Die Proben werden bei einer Versuchstemperatur getrocknet bis sich ungefähr ein Gleichgewichtszustand einstellt. Eine umfassende Diskussion der Ergebnisse von solchen Versuchen ist in /5.5.26./ zu finden. Hinsichtlich der Versuchsführung sind folgende Gesichtspunkte hervorzuheben:

- Stationäre Kriechdaten hängen stark von der jeweiligen Versuchsmethode ab.
- Stationäre Kriechversuche müssen mit Probekörpern durchgeführt werden, die bei der Versuchstemperatur im thermischen Gleichgewicht vorliegen.
- Feuchtetransport erhöht die Kriechgeschwindigkeit und muß vermieden werden.
- Versuchsdauer: Langzeitkriechversuche sollen eine Abschätzung von Endkriechwerten ermöglichen. Für die praktische Anwendung sind Kriechwerte, die innerhalb von einigen Stunden zu beobachten sind, von geringer Bedeutung.

At temperatures significantly higher than 100° C moisture loss cannot be prevented with high certainty. Therefore tests of this type are performed with unsealed concrete specimens. Most specimens are dried at test temperature until physical and chemical reactions come to an end. A comprehensive discussion of the corresponding investigations and tests of this type is given in /5.5.26./ whereby the following aspects are pointed out:

- Steady state creep values generally are significantly influenced by the test method used.
- Steady state creep tests must be performed with concrete specimens which are dried at test temperatures until equilibrium is reached.
- Moisture movement increases the creep rates and must be strictly avoided during the test.
- Test periods: - Long term tests are required to estimate final creep values for practical application. Little information is obtained during the first few hours.
- The creep rates observed with steady state tests are very much less than those creep values observed under transient temperature conditions (see Section 5.6.).

From the available test results the following conclusions can be drawn:

- a) The type of concrete has no significant influence on the steady state creep values within the reported scatter of the data (s.fig. 5.5.2.).
- b) Creep rates at 300° C are 3 to 6 times higher than at ambient temperatures. At temperatures > 300° C a significant increase in creep is likely to occur (s. fig. 5.5.3.).
- c) Normal and lightweight concretes indicated similar creep effects. Concrete with quartzite aggregate showed higher creep strains than concrete with expanded clay at temperatures > 300° C (comp. fig. 5.5.4. and 5.5.5.).

- Kriechgeschwindigkeiten, die bei stationären Langzeitversuchen zu beobachten sind, liegen deutlich unter den Geschwindigkeitswerten, die bei instationären Kriechversuchen auftreten (vergl. Abschn. 5.6.).

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Betonart hat keinen deutlichen Einfluß auf die Kriechwerte im Rahmen der vorliegenden Streuung von Daten (s. Bild 5.5.2.).
- Die Kriechgeschwindigkeit bei 300° C ist etwa 3 bis 6mal größer als bei Raumtemperatur. Bei Temperaturen oberhalb 300° C ist ein bedeutender Anstieg in der Kriechgeschwindigkeit zu erwarten (s. Bild 5.5.3.).
- Normal- und Leichtbeton zeigen ähnliche Kriecheffekte. Beton mit Quarzzuschlag ergab höhere Kriechverformungen als Beton mit Blähtonzuschlag, sofern  $T > 300^\circ\text{C}$  ist (vergl. Bild 5.5.4. und 5.5.5.).

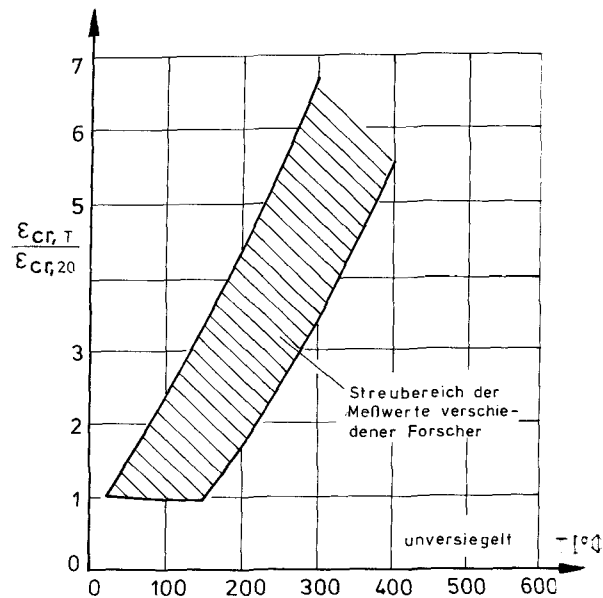


Bild 5.5.2 : Relative Kriechverformungen von Normalbetonen mit verschiedenen Zuschlagstoffen

Fig. 5.5.2 : Relative creep strains of normal concretes with different types of aggregate

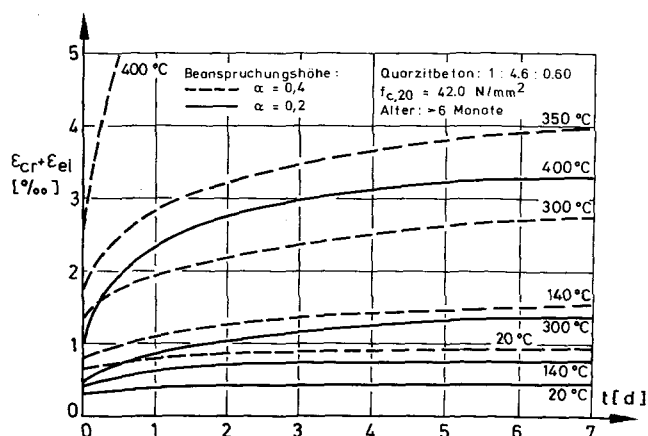


Bild 5.5.3 : Einfluß der Belastungshöhe auf das Kriechen von Normalbeton nach /5.5.14./

Fig. 5.5.3 : Influence of the load level on the creep of normal concrete according to /5.5.14./

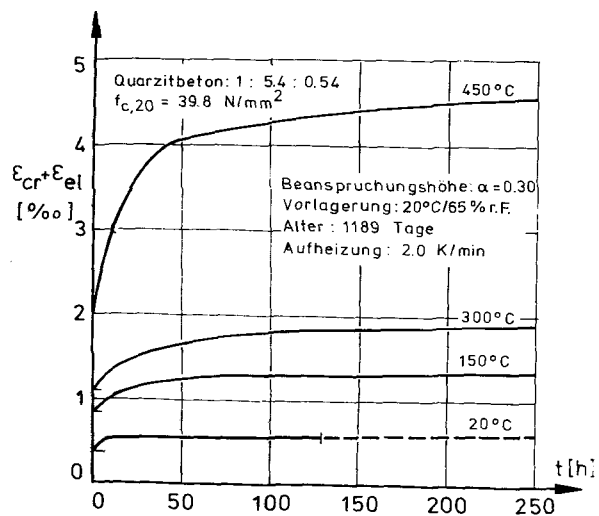


Bild 5.5.4 : Hochtemperaturkriechen von Normalbeton mit Quarzzuschlag

Fig. 5.5.4 : High temperature creep of normal concrete with quartz aggregate



- d) Der Ausnutzungsgrad und die Kriechverformungen sind nach /5.5.14./ und /5.5.26./ nicht linear, nach /5.5.19./ streng linear miteinander verknüpft.
- e) Das Superpositionsprinzip (Boltzmann Prinzip) ist bei hohen Temperaturen nicht exakt gültig. Für Kriechberechnungen wurde von /5.5.26./ ein Potenzgesetz  $\epsilon_{cr} = a \cdot t^b$  vorgeschlagen, wobei bis 400°C für b nur ein geringer Temperatureinfluß beobachtet wurde.
- f) Hochtemperatur-Kriechverformungen lassen sich in einen reversiblen und einen irreversiblen Anteil aufspalten. Der reversible Anteil der Kriechverformungen ist vergleichsweise klein und vermutlich relativ kleiner als aus Versuchen bei Raumtemperatur bekannt /5.5.26./.

Relaxationsversuche sind im allgemeinen nicht einfach durchzuführen. Relaxationswerte, die bei hohen Temperaturen gewonnen wurden, liegen deshalb nur begrenzt vor (s. Bild 5.5.6.). Unter Relaxation versteht man die Umwandlung innerer elastischer Deh-

- d) The load level indicates nonlinear influences on the creep strains according to /5.5.14./ and /5.5.26./, whereas /5.5.19./ proposes a strictly linear relationship.
- e) The superposition principle (Boltzmann's principle) cannot be applied at high temperatures. For creep calculations a power law  $\epsilon_{cr} = a \cdot t^b$  was proposed by /5.5.7./. Only little temperature effects on "b" were observed up to 400° C.
- f) High temperature creep strains may be split into reversible and irreversible strains. The reversible part of creep seems to be somewhat lower than that found at ambient temperatures /5.5.26./.

Relaxation tests are not easy to perform and only few high temperature data are available on relaxation effects (see fig. 5.5.6.). Relaxation is the distortion of internal elastic strains by viscoplastic flow deformations in a material under isothermal conditions i.e. a relaxation test is more or less the mechanical counterpart of a creep test.

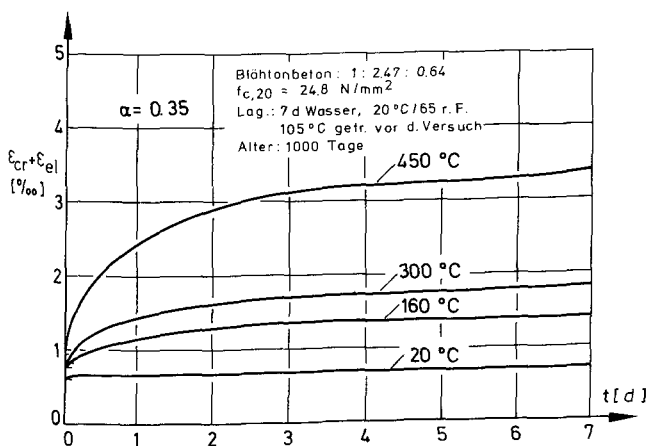


Bild 5.5.5 : Hochtemperaturkriechen von Leichtbeton mit Blähtonzuschlag

Fig. 5.5.5 : High temperature creep of lightweight concrete with expanded clay aggregate

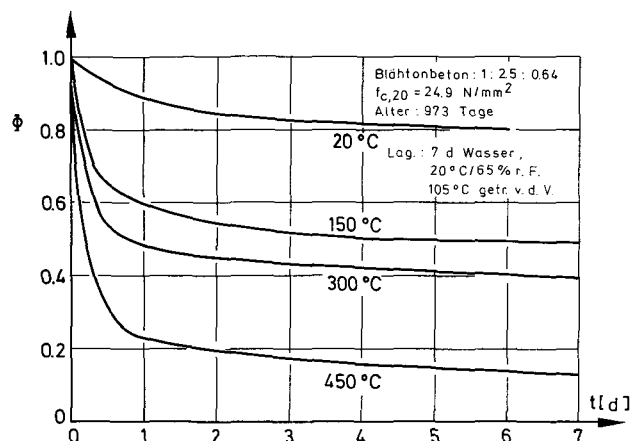


Bild 5.5.6 : Relaxation von Leichtbeton mit Blähtonzuschlag bei hohen Temperaturen

Fig. 5.5.6 : Relaxation of lightweight concrete with expanded clay aggregate at high temperatures

nungen in viskoelastische Verformungen bei konstanter Probenlänge im isothermen Zustand, d.h. der Relaxationsversuch stellt gewissermaßen das mechanische Gegenstück zu einem Kriechversuch dar. Es kann deshalb auch angenommen werden, daß die allgemeinen Beobachtungen, die bei Kriechversuchen gemacht werden, auch für Relaxationsversuche zutreffen oder sich zumindest sinngemäß übertragen lassen.

Wie zu erwarten, steigt die Relaxation mit zunehmender Temperatur erheblich an. Im Gegensatz zu den sich langsam entwickelnden stationären Kriechverformungen erfolgt die Spannungsrelaxation sofort nach der Lastaufbringung (s.Bild 5.5.6.). Eine theoretische Untersuchung über Hochtemperaturkriechen und -relaxation wurde von Schneider /5.5.26./ durchgeführt.

Schwinden bei hohen Temperaturen ist von geringer Wichtigkeit. Das Schwinden selbst wird von verschiedenen Forschern erwähnt, wobei auch Versuchstemperaturen deutlich über 100° C erfaßt sind. Die Gründe für solche Schwindeffekte können sein:

- verzögerte Diffusion,
- langsame Phasenumwandlungen,
- langsames Kristallwachstum.

Da die Schwindverformungen klein sind, verglichen z.B. mit der thermischen Dehnung von Beton, konnten in der Literatur nur wenig Daten gefunden werden (s.Bild 5.5.7.). Kriechversuchsdaten aus Versuchen mit unversiegelten Proben enthalten normalerweise auch Schwindanteile, weil die Ermittlung gesonderter Schwindwerte bei hohen Temperaturen sehr aufwendig ist. Im Hinblick auf die Anwendung von Verformungsdaten in der Praxis scheint diese Methode hinreichend genau.

Therefore we can assume that the general observations from creep tests given above in this connexion apply for relaxation too.

As would be expected stress relaxation develops quickly at elevated temperatures. In contrast to the steady state creep strain the main part of stress relaxation occurs immediately after loading (s.fig.5.5.6.). A theoretical evaluation of high temperature creep and relaxation effects of concrete has been given by Schneider /see 5.5.26./.

Shrinkage at high temperatures seems to be of minor importance. The effect of shrinkage has been mentioned by different workers under steady state conditions at temperatures well beyond 100° C. The reasons of this effect might be

- delayed diffusion,
- slow phase changes,
- slow crystal growth.

As this type of deformations normally is small e.g. compared to thermal expansion, little information could be found in the literature (fig. 5.5.7.). Creep strains from tests with unsealed concrete specimens do normally include shrinkage strains as it is difficult to obtain separate shrinkage data at high temperatures. From the viewpoint of practical application of strain data this method seems to be of sufficient accuracy.

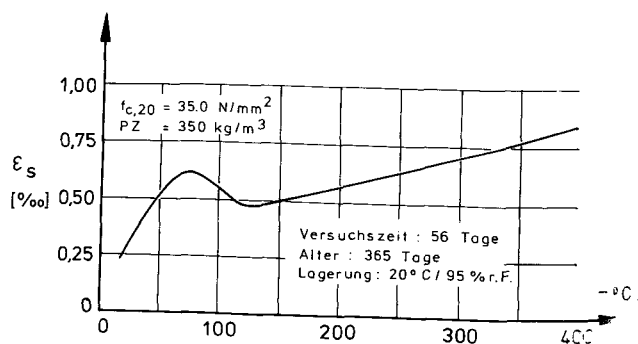


Bild 5.5.7 : Schwinden von unversiegeltem Normalbeton mit quarzitischem Zuschlag nach /5.5.19./

Fig. 5.5.7 : Shrinkage of unsealed normal concrete with quartzitic aggregate according to /5.5.19./

#### 5.5.2. Stationäre Versuche bei $T < 250^{\circ}\text{C}$

Literatursichtungen über das Kriechverhalten von Beton im Bereich von 20 bis  $250^{\circ}\text{C}$  liegen von Geymayer /5.5.11./, Stegbauer /5.5.28./, Eibl et al. /5.5.8./ und Aschl /5.5.2./ vor. Die Untersuchungen wurden vor allem unter dem Gesichtspunkt, die verschiedenen Theorien über Temperatureffekte bei Betonkriechen zu durchleuchten und im Hinblick auf die Anwendung von Kriechdaten für die Konstruktion von PCRV's durchgeführt. Mit diesen Arbeiten konnten jedoch nicht alle Probleme gelöst werden, weil sich die veröffentlichten Versuchsergebnisse teilweise widersprechen. Soweit es versiegelte Betonproben betrifft, kann von den folgenden allgemeinen Feststellungen ausgegangen werden:

- a) Das Grundkriechen bei erhöhten Temperaturen folgt etwa den Gesetzmäßigkeiten, die bei Raumtemperatur gelten, d.h. es besteht ungefähr eine Exponentialbeziehung zwischen dem Kriechen und der Belastungsdauer.
- b) Der Temperatureffekt bis  $50^{\circ}\text{C}$  führt zu einem Anstieg der Kriechverformungen. Nach Bild 5.5.8. aus /5.5.2./ ist der Kriechwert 1.5mal größer als bei  $20^{\circ}\text{C}$ . Nach Bild 5.5.9. aus /5.5.11./ ergeben sich sogar 2.5mal höhere Werte. Im Bereich von 50 bis  $100^{\circ}\text{C}$  gibt es einige grundsätzlich widersprüchliche Ergebnisse und Meinungen. Geymayer /5.5.10./ und Eibl /5.5.8./ berichten über einen weiteren Kriechanstieg, der bei  $80^{\circ}\text{C}$  etwa 4 bis 6mal höhere Kriechwerte ergibt als bei  $20^{\circ}\text{C}$ . Aschl /5.5.3./ hat demgegenüber ermittelt, daß das Kriechen bei  $80^{\circ}\text{C}$  nur etwa 2.5mal größer ist als bei Raumtemperatur.
- c) Die Probenversiegelung hat großen Einfluß auf die Kriechverformungen (s. Bild 5.5.10.). Bis  $100^{\circ}\text{C}$  ist der Einfluß der Feuchtwanderung u.U. größer als der Temperatureffekt.
- d) Grundkriechen ist etwa linear mit der angebrachten Spannung verknüpft. Dies gilt bis zu einer Ausnutzung von etwa 50% (s. Bild 5.5.11.).

#### 5.5.2. Steady state tests at $T < 250^{\circ}\text{C}$

Reviews of the literature on the effect of elevated temperatures on creep of concrete in the range from 20 to  $250^{\circ}\text{C}$  are given by Geymayer /5.5.11./, Stegbauer /5.5.28./, Eibl et al. /5.5.8./, and Aschl /5.5.2./. The investigations have been performed in the light of the several theories on temperature effects on creep and with respect to the application of creep data for PCRV design. The results have not solved the whole problem as the reported data are contradictory to some extent. As far as sealed concrete specimens concerns the following general conclusions can be drawn:

- a) Basic creep at elevated temperature follows the same pattern as creep at room temperatures, i.e. it is approximately an exponential function of the time under load.
- b) The effect of temperatures up to  $50^{\circ}\text{C}$  is to increase creep by a factor 1.5, see fig. 5.5.8. taken from /5.5.2./ or 2.5 see fig. 5.5.9. taken from /5.5.11./. Between 50 and  $100^{\circ}\text{C}$  some controversy exists about whether or not there is a further increase of creep. Geymayer e.g. /5.5.10./ and Eibl /5.5.8./ review reports indicate an increase of creep at  $80^{\circ}\text{C}$  being in the order of four to six times greater than creep at room temperatures. Aschl /5.5.3./ reports an increase of creep at  $80^{\circ}\text{C}$  being only 2.5 times greater than creep at  $20^{\circ}\text{C}$ .
- c) Sealing conditions are important for the creep strains (see fig. 5.5.10.). Up to  $100^{\circ}\text{C}$  the influence of moisture transport is higher than the temperature effect.
- d) Basic creep is a fairly linear function of the stress applied up to 50% load level (see fig. 5.5.11.).

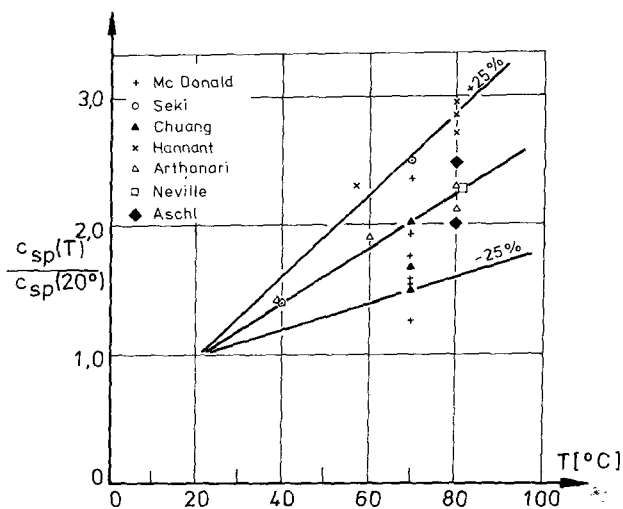


Bild 5.5.8 : Bezogene spezifische Kriechmaße von versiegeltem Beton aus /5.5.3./

Fig. 5.5.8 : Relative specific creep strains of sealed concrete taken from /5.5.3./

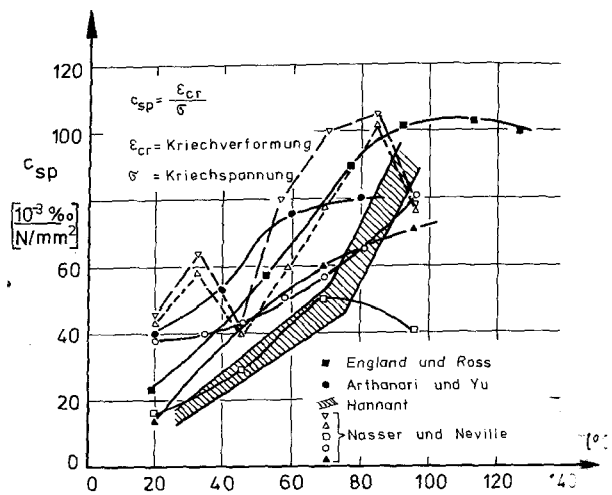


Bild 5.5.9 : Spezifisches Kriechen von versiegeltem Beton nach 60 bis 100-tägiger Belastung aus /5.5.11./

Fig. 5.5.9 : Specific creep of sealed concrete after 60 to 100 days of loading taken from /5.5.11./

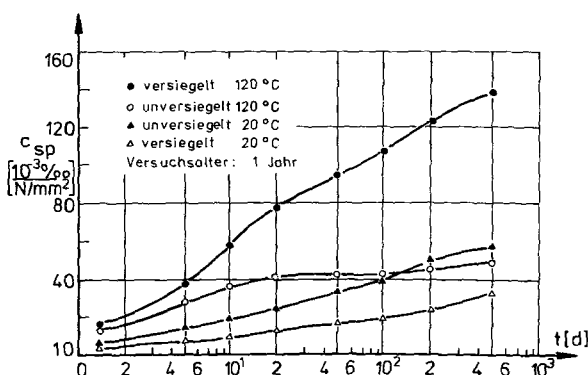


Bild 5.5.10 : Spezifisches Kriechen von kalzitischem Beton im versiegelten und unversiegelten Zustand nach /5.5.10./

Fig. 5.5.10 : Specific creep of sealed and unsealed limestone concrete according to /5.5.10./

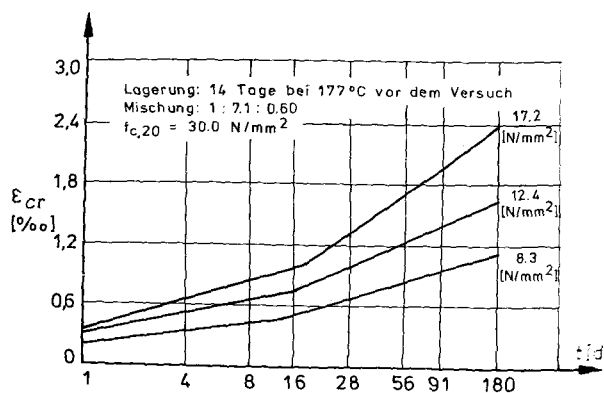


Bild 5.5.11 : Einfluß der Beanspruchungshöhe auf das Kriechen von versiegeltem Dolomitbeton bei 177°C nach /5.5.21./

Fig. 5.5.11 : Influence of the load level on the creep of sealed dolomite concrete at 177°C according to /5.5.21./

e) Einige Untersuchungen haben Kriechmaxima bei 70 und 170° C ergeben, insbesondere nach Belastungsdauern zwischen 20 und 200 Tagen (s. Bild 5.5.12.).

f) Betonzuschläge mit niedrigem E-Modul begünstigen erhöhtes Kriechen (s.Bild 5.5.13.).

g) Lagerung der Proben bei erhöhter Temperatur führt zu kleineren Temperaturkriechwerten verglichen mit normal gelagerten Proben.

h) Die Kriecherholung ist geringer als die Kriechzunahme bei erhöhter Temperatur. Sie scheint nahezu unabhängig vom Beanspruchungsgrad und den Versuchstemperaturen zu sein.

i) Die Poisson-Zahl für mehraxiales Kriechen ist bis 80° C nahezu unabhängig von der Art der Belastung (s.Bild 5.5.14.).

e) Some investigations indicate creep maxima at 70 and 170°C , especially after load periods between 20 and 200 days (see fig. 5.5.12.).

f) Concrete aggregates with a low modulus of elasticity favour an increase of creep (see fig. 5.5.13.).

g) Curing of specimens at elevated temperatures leads to a lower creep at elevated temperatures compared to normal cured specimens.

h) Creep recovery is smaller than the increase of creep strains with temperatures. The recovery seems to be independent of temperatures and load levels.

i) The Poisson's ratio for multi-dimensional creep is fairly independent from the type of load up to 80°C (see fig. 5.5.14.).

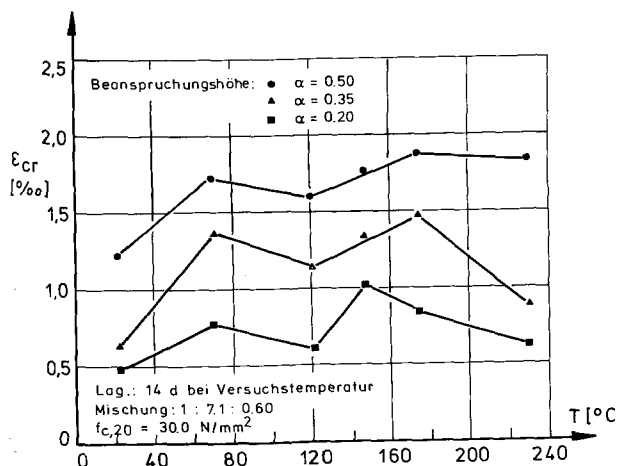


Bild 5.5.12 : Kriechen von versiegeltem Dolomitbeton nach 180 Tagen nach /5.5.21./

Fig. 5.5.12 : Creep of sealed dolomite concrete after 180 days according to /5.5.21./

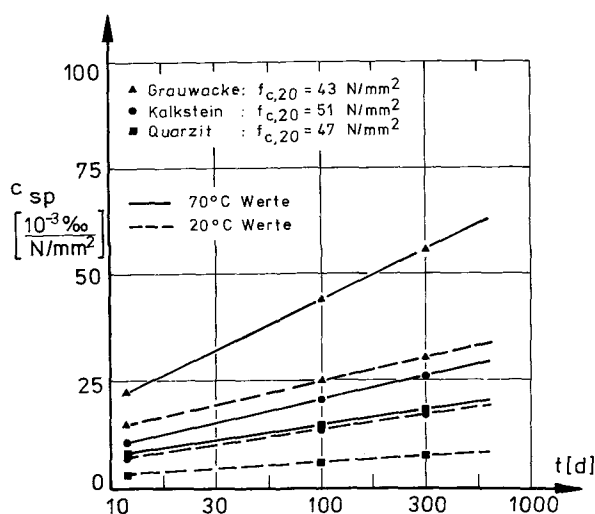


Bild 5.5.13 : Einfluß des Betonzuschlags auf das Kriechen von versiegeltem Beton nach /5.5.20./

Fig. 5.5.13 : Influence of the type of aggregate on the creep of sealed concrete according to /5.5.20./

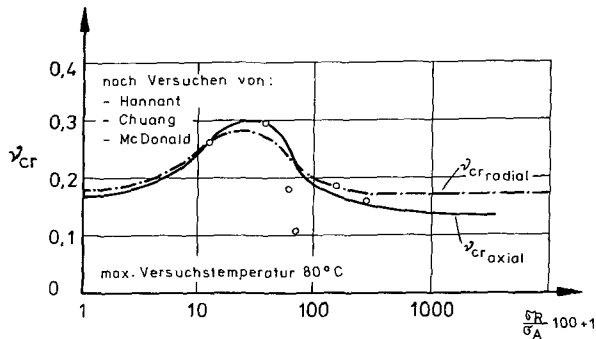


Bild 5.5.14 : Abhängigkeit der mehrachsigen Querkriechzahl in axialer und radialer Richtung vom Spannungsverhältnis  $\sigma_{\text{radial}}/\sigma_{\text{axial}}$  aus /5.5.28./

Fig. 5.5.14 : Dependence of the Poisson's ratio for axial and radial creep upon the stress ratio  $\sigma_{\text{radial}}/\sigma_{\text{axial}}$  taken from /5.5.28./

j) Es ist nicht geklärt, ob das Hochtemperaturkriechen nur eine beschleunigte Volumenänderung darstellt oder ob es sich um eine kontinuierliche Zunahme der Dehnungen handelt ohne Rücksicht auf den Zeitmaßstab.

k) Eine Vorhersage von Kriechverformungen bei erhöhten Temperaturen ist ohne Versuche nicht möglich. Für Übersichtsrechnungen liegen jedoch brauchbare Rechenmodelle vor (s. Bild 5.5.15. aus /5.5.31./).

Schwinden zwischen 20 und 100°C ist nahezu temperaturunabhängig, soweit es die Endschwindmaße betrifft. Für Spannbetondruckbehälter sind in der Literatur folgende Schwindwerte vorgeschlagen:

Kalksteinbeton: 20-100°C ; 200 - 300 · 10<sup>-6</sup>  
 Kalksteinbeton: ~ 80°C ; 300 - 400 · 10<sup>-6</sup>  
 Quarzbeton: 20-100°C ; 200 - 450 · 10<sup>-6</sup>  
 Kalksteinbeton: ~ 150°C ; ~ 500 · 10<sup>-6</sup>  
 Kalksteinbeton: 150-350°C ; ~ 800 · 10<sup>-6</sup>

j) It is not clear whether high temperature creep is just an accelerated change of volume or a continuous increase of total strains irrespectively of time scale.

k) A prediction of creep strains at elevated temperatures without any test is not possible. For a rough estimation fairly good calculation models exist, see fig 5.5.15. taken from /5.5.31./.

Shrinkage between 20 and 100°C is nearly independent of temperatures as far as final shrinkage values concerns. The following final shrinkage values for PCR design have been proposed in the literature by different workers:

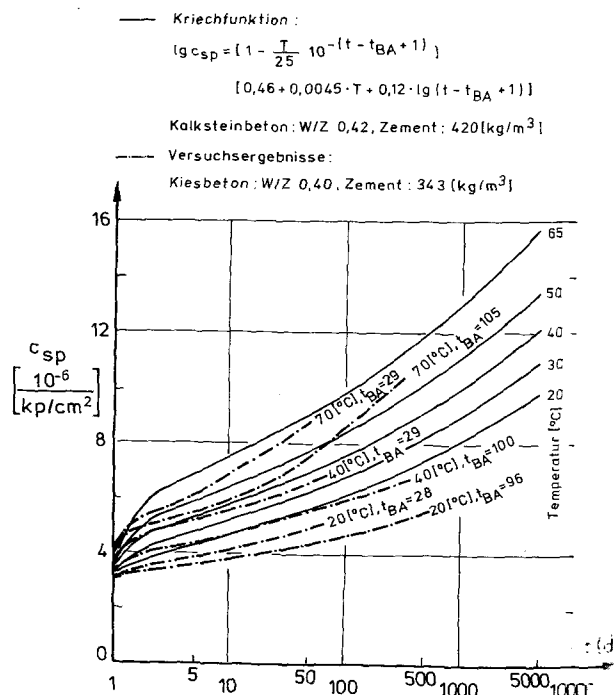


Bild 5.5.15 : Kriechen von versiegeltem Beton im Vergleich mit Versuchsergebnissen nach /5.5.31./

Fig. 5.5.15 : Creep of sealed concrete compared to test results according to /5.5.31./

Relaxationsversuche an versiegelten Betonproben sind nach vorliegenden Erkenntnissen bisher nicht veröffentlicht worden.

Der folgende Abschnitt enthält eine gedrängte Zusammenstellung der wichtigsten Kriechliteratur. Ausführlichere Zusammenstellungen liegen vor, worauf an dieser Stelle ausdrücklich hingewiesen wird.

limestone concrete: 20-100°C; 200-300·10<sup>-6</sup>  
limestone concrete: ~ 80°C; 300-400·10<sup>-6</sup>  
quartzite concrete: 20-100°C; 200-450·10<sup>-6</sup>  
limestone concrete: ~150°C; ~500·10<sup>-6</sup>  
limestone concrete: 150-350°C; ~800·10<sup>-6</sup>

Relaxation tests with sealed concrete specimens have not been reported according to our experience up to now.

The following chapter contains a concise summary of important literature on creep investigations and creep effects. Complete documentations have been given elsewhere, which is pointed out in this context.

### 5.5.3. Literatur                      Literature

- /5.5.1./ Arthanari, S., Yu, C.W.: Creep of concrete under uniaxial and biaxial stresses at elevated temperatures. Magazine of Concrete Research, Vol. 19/No. 60, Sept. 1967.
- /5.5.2./ Aschl, H.: Mechanical properties of mass concrete at elevated temperatures. Report (unpublished). Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 1977 (in German).
- /5.5.3./ Aschl, H. and Stöckl, S.: Thermal expansion, E-Modul, shrinkage, creep and strength of reactor concrete under uniaxial load and elevated temperatures. Report (unpublished). Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 1981 (in German).
- /5.5.4./ Browne, R.D.; Bamforth, P.B.: The long term creep of the Wylfa P.V. concrete for loading ages up to 12.5 years. 3th Int. Conf. SMIRT, paper no. H1/8, London, 1975.
- /5.5.5./ Browne, R.D.: Properties of concrete in reactor vessels. Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels, Westminster, Group C, Paper 13, 1967.
- /5.5.6./ Cruz, C.R.: Apparatus from measuring creep of concrete at high temperatures. Journal of PCA, Research and Development Laboratories, Vol.10, pp.36-42, Sept. 1968.
- /5.5.7./ Dougill, J.W.: The effect of thermal incompatibility and shrinkage on the strength of concrete. Mag. of Con. Res. 13, pp. 119-126, 1961.
- /5.5.8./ Eibl, J. et al.: Literature survey on concrete properties with respect to PCRV design. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 237, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1974 (in German).
- /5.5.9./ England, G.L. and Ross, A.D.: Reinforced concrete under thermal gradients. Mag. of Concrete Research, CCA, Vol. 14, No. 40, pp. 5 - 12, 1962.
- /5.5.10./ Geymayer, H.G.: The effect of Temperature on Creep of Concrete; a Literature Review. ACI Seminar, Berlin 1970.

- /5.5.11./ Geymayer, H.G.: The effect of temperature on creep of concrete - a literature review. Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper C-70-1, Vicksburg, 1970.
- /5.5.12./ Gopalakrishnan, K.S., Neville, A.M., Ghali, A.: A Hypothesis on Mechanism of Creep of Concrete with Reference to Multiaxial Compression. ACI-Journal, Januar 1970.
- /5.5.13./ Gopalakrishnan, K.S., Neville, A.M., Ghali, A.: Creep Poisson's Ratio of Concrete under Multiaxial Compression. ACI-Journal, Dec. 1969.
- /5.5.14./ Gross, H.: On high temperature creep of concrete. 2nd Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Techn., Vol.3, Part H 6/5, Berlin 1973.
- /5.5.15./ Hannant, D.J.: Creep and creep recovery of concrete subjected to multiaxial compressive Stress. ACI-Journal, May 1969.
- /5.5.16./ Hannant, D.J.: Strain behaviour of concrete up to 95°C under compressive stresses. Group C, Paper 17, Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels, Westminster, 1967.
- /5.5.17./ L'Hermite, R.G., Mamillan, M.: Further results of shrinkage and creep tests. Intern. Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, 1968.
- /5.5.18./ Lothia, R.P., and K.W. Nasser: Apparatus for high temperature creep tests of concrete. ACI-Journal, February 1971.
- /5.5.19./ Maréchal, J.C.: Le fluage du béton en fonction de la température (Creep of concrete as a function of the temperature). Rilem Colloquium, also in: Matériaux et constructions, Vol.2, No.8, pp. 111-115, 1969.
- /5.5.20./ McDonald, J.E.: An Experimental Study of Multiaxial Creep in Concrete ACI Seminar, Berlin, 1970.
- /5.5.21./ Nasser, K.W., Lothia, R.P.: Mass concrete properties at high temperatures. ACI-Journal, March 1971.
- /5.5.22./ Nasser, K.W., and A.M. Neville: Creep of concrete at elevated temperatures. Journal of ACI, Detroit, December 1965.
- /5.5.23./ Nasser, K.W., Neville, A.M.: Creep of old concrete at normal and elevated temperatures. ACI Journal, No. 64-9, pp. 97-103, 1967.
- /5.5.24./ Purkiss, J.A., and J.W. Dougill: Apparatus for compression tests on concrete at high temperatures. Magazine of Concrete Research, Vol.29; No.83, June 1973.
- /5.5.25./ Ross, A.D., Parkinson, J.D.: Shrinkage in concrete pressure vessels. Nuclear Engineering and Design, 5, 1967.
- /5.5.26./ Schneider, U.: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen (Consideration of the question of creep and the relaxation of concrete at high temperatures). Habilitation, TU Braunschweig, 1979.
- /5.5.27./ Seki, S., and M. Kawasumi: Creep of concrete at elevated temperatures. ACI-Int. Seminar on Concrete for Nuclear Reactors, Berlin, 1970.
- /5.5.28./ Stegbauer, A.: Creep of concrete at elevated temperatures under multiaxial compression. Report (unpublished). Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 1972 (in German).



/5.5.29./ Sullivan, P.J.E., and G.A.Khoury: Short term creep of a lighthweight aggregate concrete at elevated temperatures. Imperial College, Paper for FIP-Congress in London, 1978.

/5.5.30./ G.P. York, T.W. Kennedy, E.S. Perry, J.N. Thompson: Effects of temperature and moisture on tri-axial creep. ACI Seminar, Berlin 1970.

/5.5.31./ Zerna, W., Schnellenbach, G., Hansson, V.: Mechanical properties of concrete for PCRV's (Werkstoffannahmen zum Kriechen und Schwinden des Betons in Spannbeton-Reaktordruckbehältern). Inst. für Konstruktiven Ingenieurbau, Bericht Nr. 3, Ruhr-Universität Bochum, 1970 (in German).

## 5.6. Instationäres Kriechen und Zwängungen

### 5.6.1. Instationäre Kriechverformungen

Instationäre Kriechversuche gemäß Bild 4.6. sind vielfach durchgeführt worden. Üblicherweise sind Betonproben bei solchen Versuchen nicht versiegelt, d.h. die Feuchteabgabe während der Aufheizung wird nicht verhindert. Aufgrund des Feuchtetransports und den physikalischen bzw. chemischen Reaktionen im Beton wurden bei einachsigen beanspruchten Proben unter solchen Bedingungen vergleichsweise große instationäre Kriechverformungen beobachtet. - Instationäre Kriechversuche haben enge Beziehungen zu den im Beton unter Feuereinwirkung vorliegenden Verhältnissen, so daß die entsprechenden Kriechdaten direkten Bezug zu den praktischen Gegebenheiten im Brandfall haben. Die Versuche ergeben Dehnungs-Temperatur-Beziehungen (Parameter: Belastung) für vorgegebene Aufheizraten. Zahlreiche Publikationen sind auf diesem Gebiet in den letzten Jahren erschienen. Theoretische Arbeiten wurden von Anderberg /5.6.2./ und Schneider /5.6.15./ durchgeführt. Die vorliegenden experimentellen Arbeiten konzentrieren sich vor allem auf folgende Untersuchungsparameter:

- Betonmischung,
- Betonzuschlag,
- Stahlfaserzugabe,
- Lagerungsbedingungen,
- Versuchsparameter (Aufheizrate).

## 5.6. Transient creep and restraining forces

### 5.6.1. Transient creep strains

Transient creep tests according to fig.4.6. have been performed many times. Normally the concrete specimens are not sealed during such tests i.e. the moisture loss is not prevented during the heat exposure. Due to the moisture transport and the related physical and chemical reactions comparatively large creep strains have been observed under such conditions. As transient creep tests have strong relations to real fire conditions they are supposed to give realistic strain data with direct relevance to fire. The tests yield strain-temperature relationships (parameter: load level) for given heating rates. Numerous publications in this field of material research have appeared recently. Theoretical considerations are given by Anderberg /5.6.2./ and Schneider /5.6.15./. Experimental investigations are reported in which the main features studied are:

- mix proportion,
- type of aggregate,
- steel fiber addition,
- curing condition,
- test conditions (heating rate).

Aus den Bildern 5.6.1. bis 5.6.6. und der zugehörigen Literatur lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Ausgangsfestigkeit ist für das instationäre Kriechen (Übergangskriechen) von geringer Bedeutung. Die kritischen Betontemperaturen (Versagenstemperatur  $T_{cr}$  unter Belastung und konstanter Aufheizrate) sind etwas geringer bei Betonen mit hoher Druckfestigkeit (s. Bild 5.6.1.) im Ausgangszustand.
- Das Zuschlag/Zement-Verhältnis hat großen Einfluß auf die Form der Dehnungs-Temperatur-Kurven und auf die kritischen Betontemperaturen  $T_{cr}$ . Die kritischen Betontemperaturen sind höher bei fetten Mischungen und hohen Ausnutzungsgraden im Vergleich zu mageren Betonmischungen. Aufgrund der größeren Kriechraten der fetten Betone, sind ihre Kriechverformungen bei unterschiedlichen Ausnutzungsgraden ebenfalls größer als bei Magerbetonen. "Fette" Betone zeigen bis 300°C

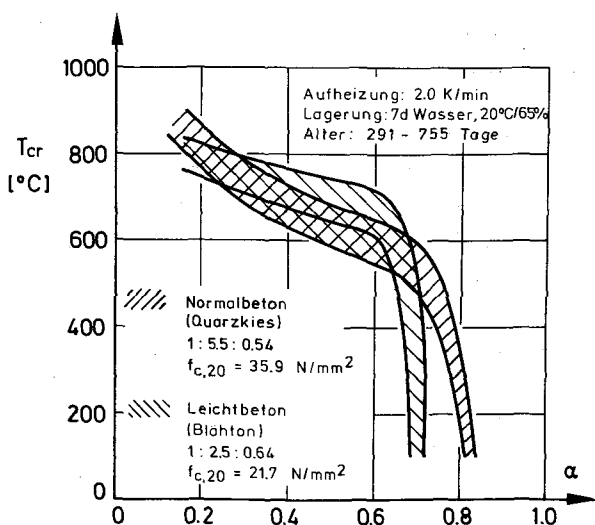


Bild 5.6.1 : Kritische Betontemperatur von üblichen Konstruktionsbetonen bei konstanter Belastung während der Aufheizung

Fig. 5.6.1 : Critical concrete temperature of ordinary structural concretes with constant load during heating up

From the figs. 5.6.1. to 5.6.6. and the related literature it can be stated:

- Original strength is of little importance for the transient creep. The critical concrete temperatures  $T_{cr}$  (point of failure under constant load and heating rate) are somewhat lower for concretes with high original strength (see fig. 5.6.1.).
- Aggregate cement ratio has a great influence on the shape of the strain-temperature curves and on the critical concrete temperatures  $T_{cr}$ . The critical concrete temperatures of rich mixes are, at higher load levels, lower in comparison to lean mixes. Because of the higher creep rate of rich mixes the creep strains at various load levels are higher for rich mixes than for lean mixes. Rich

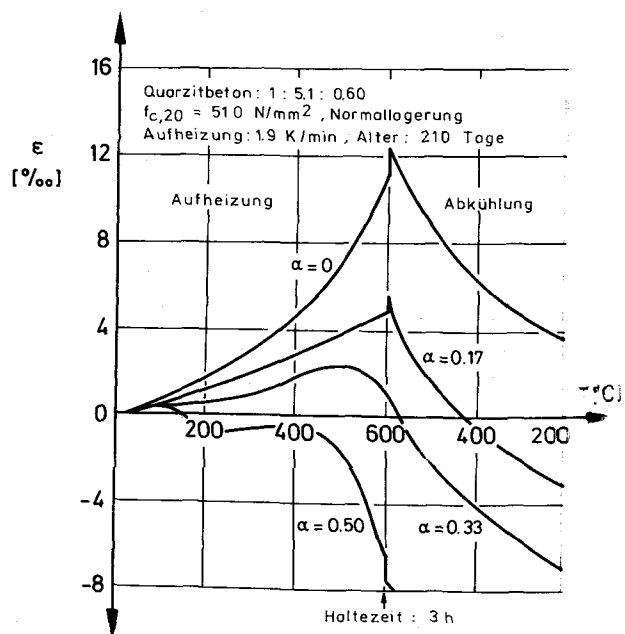


Bild 5.6.2 : Gesamtverformung von Normalbeton unter konstanter Belastung während eines Aufheiz-Abkühlzyklusses nach /5.6.19./

Fig. 5.6.2 : Total deformation of normal concrete under constant load during a heating-cooling-cycle according to /5.6.19./

eine größere thermische Dehnung als vergleichbare Magerbetone, oberhalb 300°C gilt das umgekehrte.

- c) Der Wasser/Zement Wert scheint bezüglich der Form der Dehnungs-Temperatur-Kurven und der kritischen Betontemperaturen von geringerem Einfluß zu sein.
- d) Die Zuschlagart ist der Haupteinflußfaktor bezüglich der Form der Dehnungs-Temperatur-Beziehungen. Dies kann gezeigt werden, indem man die einzelnen Verformungskomponenten wie thermische Dehnung, elastische Dehnung und instationäre Kriechverformung (welche alle nicht elastischen Verformungen pauschal zusammenfaßt) diskutiert. Die thermischen Dehnungen und auch die elastischen Verformungen sind entsprechend Abschnitt 3.6. und 5.3. stark vom Betonzuschlag beeinflusst. Für das instationäre Kriechen gemäß /5.6.15./ trifft dieses ebenfalls zu. Die "instationären" Kriechkurven von Sandstein-, Basalt- und Kiesbetonen haben etwa die gleichen Formen, wobei sich für Basaltbeton  $\phi$ -Werte ergeben haben, die dicht oberhalb der Werte von Kies- und Sandsteinbeton liegen /5.6.16./. Die Kriechkurven von Beton mit Leichtzuschlag zeigen bis ca. 400° C etwa den gleichen Verlauf, wie die Kurven der anderen Betone. Oberhalb von 400°C tritt ein Anstieg der Kriechfaktoren auf. Sie sind 2 bis 3mal größer als bei Normalbetonen. Zusammenfassend kann folgendes gesagt werden: Je härter der Zuschlag und je kleiner die thermische Dehnung, umso kleiner sind die absoluten Verformungen des Betons im instationären Kriechversuch. Leichtbeton mit Blähtonzuschlag zeigt die kleinsten Gesamtverformungen. Infolge ihrer höheren Kriechfähigkeit erfolgt in den Betonen mit "weichen" Zuschlägen bei sehr hohen Temperaturen eine Umverteilung der inneren Spannungen (s.Bild 5.6.3. bis 5.6.4.). Als Konsequenz ergeben sich daraus für solche Betone üblicherweise höhere kritische Betontemperaturen.

mixes also indicate a greater thermal expansion up to 300°C, beyond 300°C the opposite holds.

- c) Water\_cement\_ratio seems to be of minor importance with respect to the shape of the strain-temperature curves and the critical concrete temperatures.
- d) Type\_of\_aggregate is the main factor affecting the shape of the strain-temperature curves. This will be shown by discussing the individual strain components derived from tests i.e. thermal expansion, elastic strain and transient creep strain (which is grouped into a single parameter accounting for non-elastic strains). Thermal expansion and the modulus of elasticity are significantly influenced by the type of aggregate. This is discussed in Section 3.6. and 5.3.. Additionally the transient creep according to /5.6.15./ is also affected by the type of aggregate. The transient creep-temperature curves of sandstone, basaltic and siliceous aggregate concretes indicated closely similar shapes. Basalt concrete showed slightly higher transient creep effects than it was found for siliceous concrete and sandstone concrete /5.6.16./. The transient creep curves of concretes with expanded clay aggregates indicated, up to about 400°C, virtually the same shape as the curves of other concretes. Above 400°C an additional increase of the transient creep appeared. The creep factors were 2 to 3 times larger than those of normal concretes. Summarizing the above statements for concretes the following conclusions can be made: The harder the aggregate and the lower its thermal expansion the lower the total deformations of normal concretes in transient creep tests. Lightweight concretes with expanded clay aggregates indicate the lowest total deformations in transient test. Due to the higher transient creep deformation of "soft" aggregate concretes at very high temperatures, those concretes indicate a redistribution of internal stresses (see fig. 5.6.3. to 5.6.4.). Consequently those concretes show usually higher critical temperatures.

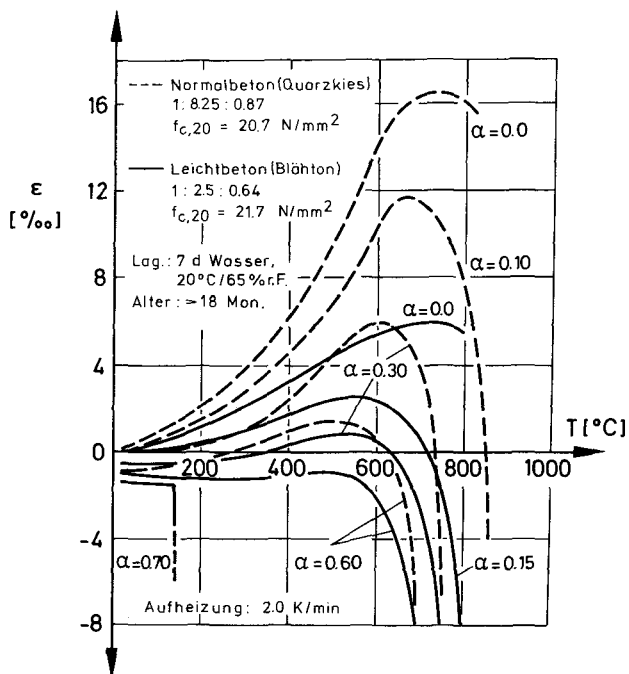


Bild 5.6.3 : Gesamtverformung von belasteten Normal- und Leichtbetonproben gleicher Festigkeit während der Aufheizung

Fig. 5.6.3 : Total deformation of loaded normal concrete and light-weight concrete specimens having the same ultimate strength during heat-up

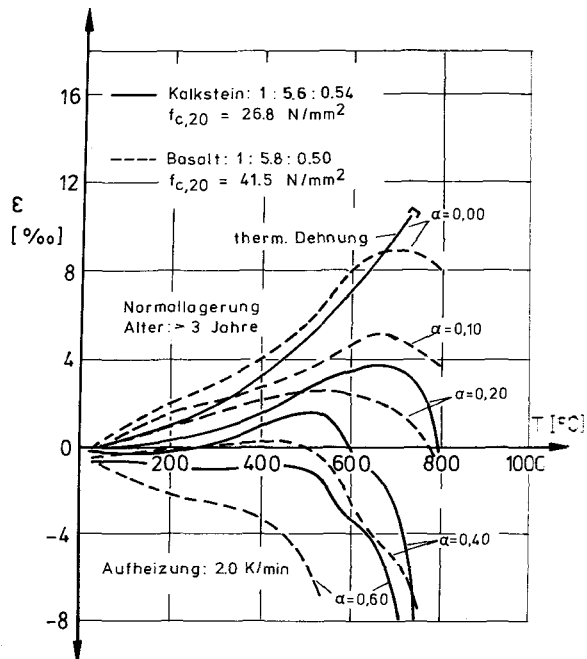


Bild 5.6.4 : Gesamtverformung von belasteten Kalkstein- und Basaltbetonproben während der Aufheizung

Fig. 5.6.4 : Total deformation of loaded limestone- and basalt concrete specimens during heat-up

e) Stahlfaserzusätze bewirken geringere Betonverformungen. Die Stahlfasern bewirken eine Art innere Verspannung im Beton (s. Bild 5.6.5.).

f) Die Lagerungsbedingungen sind von großem Einfluß. Das instationäre Kriechen ist zwischen 20 und 300°C stark vom Feuchtegehalt und von der Feuchtwanderung bestimmt. Lufttrockene (20/65) und ofengetrocknete Proben (105°C) zeigen bedeutend geringere Kriechverformungen als feuchtgelagerte Proben. Der Einfluß der Betonfeuchte auf die kritischen Betontemperaturen ist jedoch vernachlässigbar.

g) Die Aufheizrate ist von geringem Einfluß, solange Heizraten zwischen 0.5 und 10 K/min betrachtet werden (s. Bild 5.6.6.).

e) Steel fibre addition generally gives less total deformations of the concrete. Obviously the fibres act as a restraining reinforcement (see fig. 5.6.5.).

f) Curing conditions are of great importance. Transient creep in the temperature range of 20°C to 300°C is heavily influenced by the moisture content and moisture movement. Air cured (20/65) and specimens oven dried at 105°C indicate a significant lower transient creep than water cured specimens. The influence of moisture content on the critical concrete temperature is negligible.

g) Rate of heating is of minor influence, heating rates between 0.5 and 10 K/min are considered (see fig. 5.6.6.).

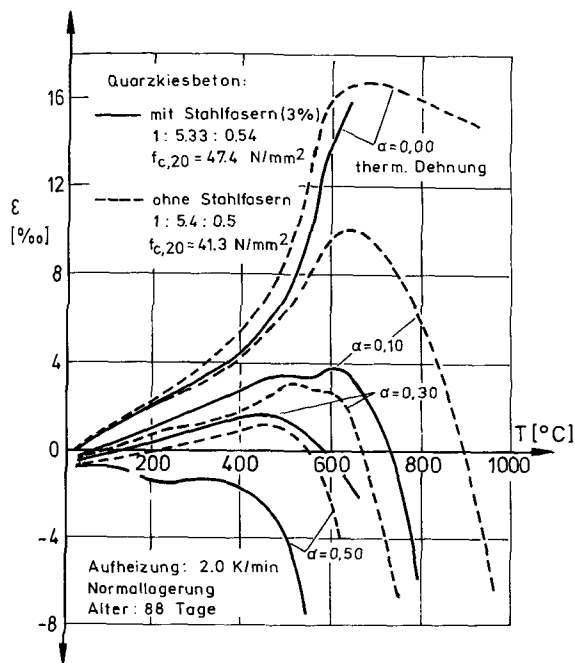


Bild 5.6.5 : Einfluß von Stahlfaserzusätzen auf das instationäre Kriechen von Beton

Fig. 5.6.5 : Influence of steel fibre content on the transient creep of concrete

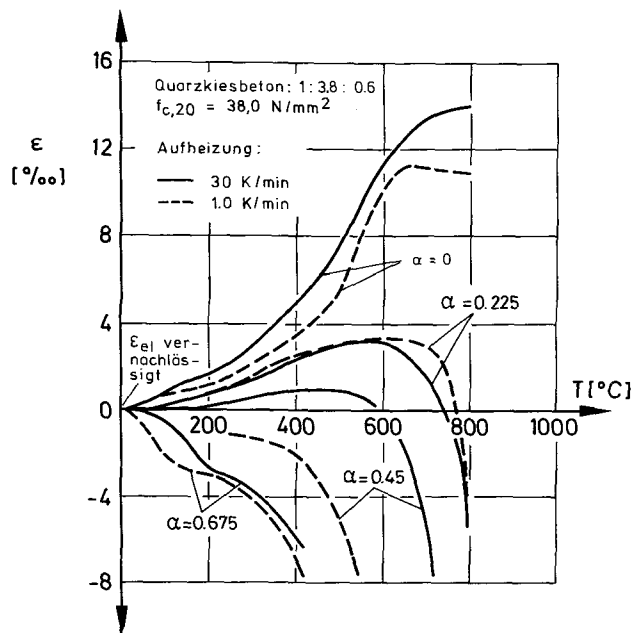


Bild 5.6.6 : Einfluß der Aufheizraten auf das instationäre Kriechen von Beton nach /5.6.2./

Fig. 5.6.6 : Influence of the heating rates on the transient creep of concrete according to /5.6.2./

#### 5.6.2. Zwängungen bei veränderlichen Temperaturen

Über Zwängungsversuche wird nur in wenigen Arbeiten berichtet. Üblicherweise werden solche Versuche entsprechend der auf Bild 4.7. angegebenen Methode durchgeführt. Die instationären Kriech- und Zwängungseffekte sind komplementär zueinander, d.h. die meisten Aussagen über das instationäre Kriechen sind bei entsprechender Auslegung auch auf Zwängungseffekte anwendbar. Beispielsweise werden bei einem Beton, der eine geringe thermische Dehnung und großes instationäres Kriechen aufweist, in der Praxis auch relativ geringe Zwängungen auftreten: Zwängungen sind sehr empfindlich bezüglich Faktoren wie Betonfeuchte, Zuschlag/Zement Verhältnis, Lagerungsbedingungen. Typische Zwangs-

#### 5.6.2. Restraining forces under transient temperatures

Restraining tests have been reported in only a few publications. Usually the tests were performed according to the test method indicated in fig. 4.7.. The restraining and transient creep phenomenon are complementary phenomena of each other. Therefore most of the statement regarding the transient creep data are (inversely) valid for the restraining data. E.g. if a special type of concrete is supposed to have a low thermal expansion and a high transient creep it follows from theoretical considerations that relative low restraining forces are to be expected. Restraining forces are very sensitive to factors like moisture content, aggregate/cement ratio, curing conditions

kraftverläufe (die Spannungen sind normalisiert :  $\sigma_{ult,20} = 1.0$ ) zeigen die Bilder 5.6.7. bis 5.6.11.. Wesentliche Einflußgrößen, die untersucht wurden, sind:

- Betonmischung,
- Betonzuschlag,
- Lagerungsbedingungen,
- Versuchsparameter (Aufheizrate).

Folgende Beobachtungen wurden dabei gemacht:

- a) Die Ausgangsfestigkeit hat nur wenig Auswirkung auf den Zwangskraft-Temperatur-Verlauf und auf das Maximum der Zwängungskräfte.
- b) Das Zuschlag/Zement-Verhältnis beeinflusst die Zwängungskräfte. Magere Betonmischungen zeigen im gesamten interessierenden Temperaturbereich höhere Zwängungen als fette Betonmischungen. Das liegt vor allem daran, daß das Kriechen vorzugsweise in der Betonmatrix abläuft.
- c) Der Betonzuschlag und die Zwängungen hängen deutlich voneinander ab. Das Verhalten von Betonen mit verschiedenen Zuschlägen ist in Übereinstimmung mit Beobachtungen über das instationäre Kriechen. Oberhalb 200°C zeigen silikatische Sandstein- und Kiesbetone die größten Zwängungskräfte, vor allem infolge ihrer vergleichsweise größeren thermischen Dehnungen. Leicht- und Basaltbetone ergeben wegen ihrer kleineren Dehnzahlen demgegenüber geringere Zwängungskräfte. Der Einfluß des instationären Kriechens aufgrund unterschiedlicher Zuschläge wird ebenfalls deutlich. Die thermische Dehnung von silikatischen Sandstein- und Kiesbetonen ist nahezu gleich, aber die hier betrachteten Kiesbetone weisen ein größeres instationäres Kriechen auf. Demzufolge ergeben sich auch geringere Zwängungskräfte wie Bild 5.6.7. zeigt. Ein Vergleich zwischen Leicht- und Basaltbetonen führt zu ähnlichen Ergebnissen (vergl. Bild 5.6.7. und 5.6.8.).

etc. Typical restraining forces (normalized to  $\sigma_{ult,20} = 1$ ) versus temperature curves are shown in figs. 5.6.7. to 5.6.11.. The main features, which have been studied are

- mix proportion,
- type of aggregate,
- curing condition;
- test condition (heating rate).

The following observations have been made:

- a) Original strength has a little influence on the shape of restraining force-temperature curves and the maxima of the restraining forces.
- b) Aggregate\_cement\_ratio affects the restraining forces. Lean concrete mixes attain over the whole temperature range significant higher values than rich mixes. This is due to the fact that creep occurs mainly in the cement matrix.
- c) Type\_of\_aggregate and the restraining forces suggest a close relationship. The behaviour of concretes made with different types of aggregates is in agreement with the results of the transient creep tests. At temperatures above 200°C the sandstone and siliceous aggregate concretes attain the highest restraining forces due to their high thermal expansion. Lightweight or basaltic aggregate concretes attain lower restraining forces due to a relatively lower thermal expansion. Differences in transient creep rates (as a function of the different aggregates used) can be seen too. The thermal expansion values of sandstone and siliceous aggregate concretes are nearly the same, but siliceous aggregate concrete shows a higher transient creep deformation and therefore attains lower restraining forces (see fig. 5.6.7.). A comparison between lightweight and basaltic aggregate concretes leads to similar results (comp. fig. 5.6.7. and 5.6.8.).

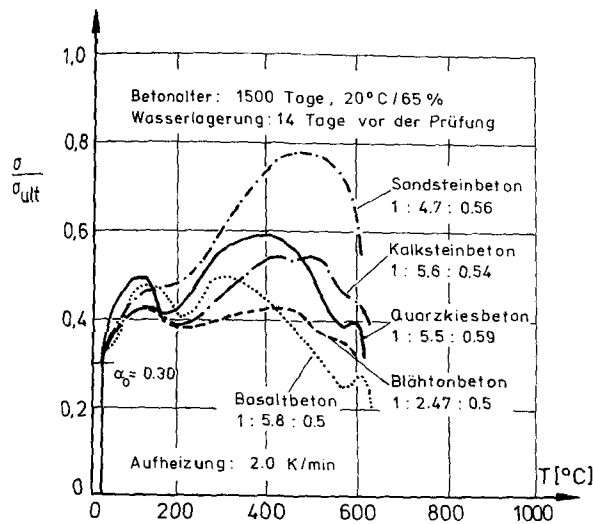


Bild 5.6.7 : Einfluß der Zuschlagsart auf den Zwangskraftverlauf bei vollständiger Dehnungsbehinderung

Fig. 5.6.7 : Influence of the type of aggregate on the restraint forces with totally restrained expansion

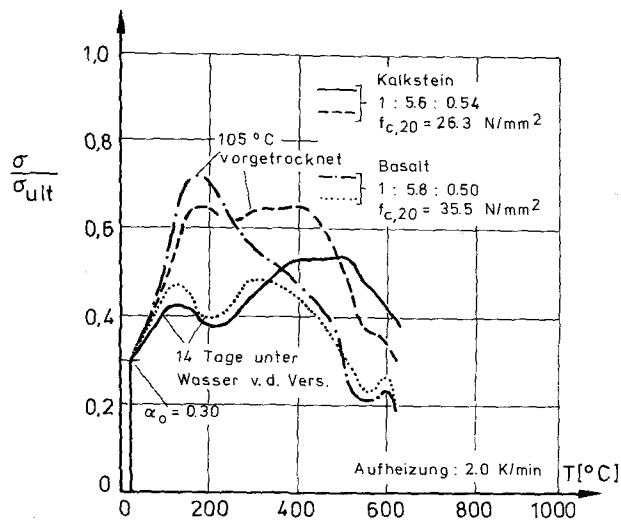


Bild 5.6.8 : Einfluß der Vorbehandlung auf den Zwangskraftverlauf bei verschiedenen Betonen

Fig. 5.6.8 : Influence of the pre-curing conditions on the restraint forces of different concretes

d) Der Feuchtegehalt beeinflusst die Zwängungsmaxima im Temperaturbereich von 20 bis 200 °C. Bei ofengetrockneten Proben (105 °C) tritt zwischen 100 und 200 °C ein deutliches Zwängungsmaximum auf. Die Zwängungskräfte erreichen Werte zwischen 70 und 80% der Bruchfestigkeit bei 20 °C. Das Zwängungsmaximum wird jedoch rasch abgebaut. Zwischen 300 und 450 °C zeigen die Zwangskraftverläufe eine Art Sattelpunkt. Oberhalb dieser Temperaturen ist eine weitere Abnahme in den Zwängungen zu beobachten. Bei 573 °C tritt manchmal noch ein kleiner Zwängungspeak infolge der  $\alpha$ - $\beta$ -Quarzinversion auf.

Das Verhalten von Betonproben mit hohem Feuchtegehalt (Wasserlagerung) ist dagegen grundsätzlich anders. Die Feuchtigkeit begünstigt die Kriechverformungen, so daß sich verglichen mit vorgetrockneten Proben bei 100 °C bedeutend geringere Zwängungskräfte ergeben. Im Temperaturbereich zwischen 100 und 200 °C tritt ein ausgeprägtes Minimum in den Zwängungen

d) Moisture content is a factor which determines the maximum value of the restraining forces in the temperature region between 20 °C to 200 °C. With the 105 °C oven-dried specimens a maximum peak appears at approximately 100 °C to 200 °C. The restraining forces attain values in the range of 70% to 80% of the ultimate strength at 20 °C. The peak decreases rapidly. Between 300 °C to 450 °C the curves indicate a saddle point. At higher temperatures a further decrease can be observed. At about 573 °C in some cases a further small peak occurs due to the quartz inversion of the aggregate.

The behaviour of concrete with a high moisture content, i.e. after water storage, is quite different. The moisture favours higher creep deformations which result in a much lower restraining peak at 100 °C compared with dried specimens. In the temperature range from 100 to 200 °C a distinct minimum occurs in the restraining forces, which is connected

auf, welches offenbar aus Trocknungs- und Schrumpfeffekten herrührt. In diesem Fall erscheint das absolute Zwängungsmaximum bei etwa 450°C. Oberhalb dieser Temperatur gehen die Zwängungen rasch zurück, wobei im Vergleich zu vorgetrockneten Proben eine geringe Verschiebung der Zwängungskurven in Richtung niedrigerer Temperaturen zu beobachten ist. Das Verhalten von normal gelagerten Proben (20/65) ist ähnlich dem der wassergelagerten Proben wie die Bilder 5.6.9. und 5.6.10. zeigen.

- e) Die Aufheizraten beeinflussen die Form und Maxima der Zwangskraft-Temperatur-Kurven kaum (s. Bild 5.6.11.). Nicht die Versuchsdauer sondern die erreichte Probentemperatur ist somit entscheidend für die Zwangskräfte! Bild 5.6.11. zeigt weiterhin, daß die Proben in diesen speziellen Versuchen bei Versuchsbeginn nicht vollständig dehnungsbehindert waren.

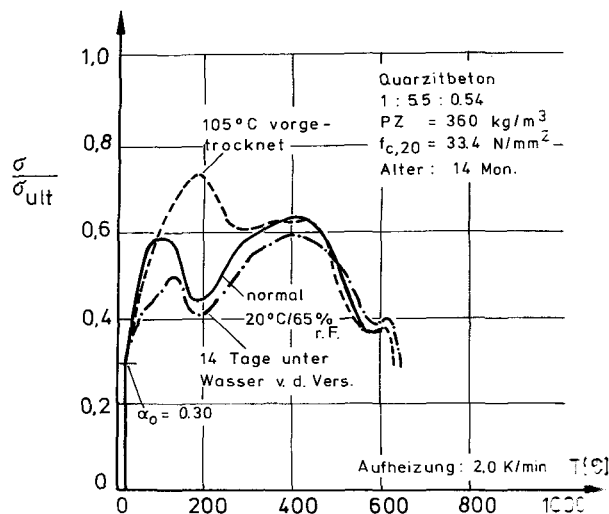


Bild 5.6.10 : Einfluß der Vorbehandlung auf den Zwangskraftverlauf von Normalbeton mit hohem Zementgehalt

Fig. 5.6.10 : Influence of the pre-curing conditions on the restraint forces of normal concrete with high cement content

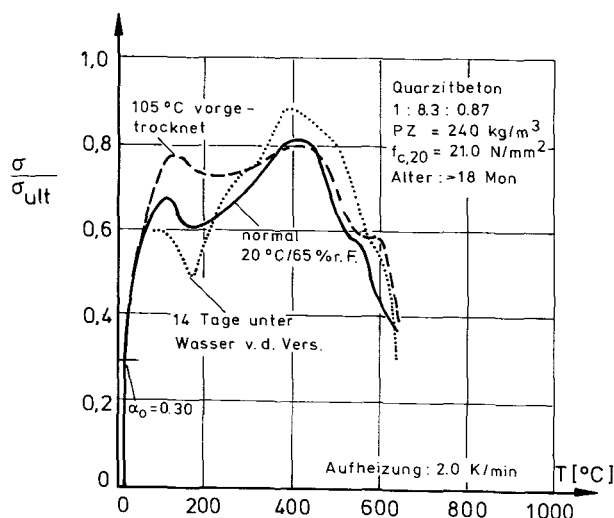


Bild 5.6.9 : Einfluß der Vorbehandlung auf den Zwangskraftverlauf von Normalbeton mit niedrigem Zementgehalt

Fig. 5.6.9 : Influence of the pre-curing conditions on the restraint forces of normal concrete with low cement content

with the rapid drying and shrinkage effects. In this case the absolute maximum restraint appears at about 450°C. Beyond this temperature the restraining forces decrease whereby a small shift of the restraining curves to lower temperatures appears compared with the pre-dried concretes. The restraint of air-conditioned specimens (20°C/65 % r.h.) is similar to the moist specimens as indicated on the figs. 5.6.9. and 5.6.10..

- e) Heating rates hardly influence the shape and the maxima of the restraining force temperature curves at all (see fig. 5.6.11.). Thus, it is not the duration of the test but the temperature attained which is decisive for the restraining forces! Fig. 5.6.11. indicates that the specimens were not completely restrained at the beginning of the tests.



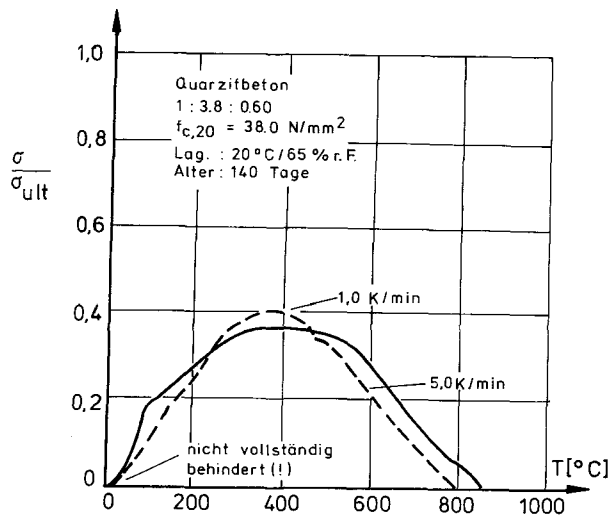


Bild 5.6.11 : Einfluß der Aufheizraten auf den Zwangskraftverlauf nach /5.6.2./

Fig. 5.6.11 : Influence of the heating rates on the restraint forces according to /5.6.2./

### 5.6.3. Literatur Literature

- /5.6.1./ Akhtaruzman, A.A.: The effect of transient and steady state temperature on concrete. Ph. D. Thesis, University of London, 1973.
- /5.6.2./ Anderberg, Y., and S. Thelanderson: Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures. 2. Experimental investigation and material behaviour model. Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Lund, Bulletin 54, 1976.
- /5.6.3./ Anderberg, Y. et al.: A constitutive law for concrete at transient high temperature conditions. ACI Publication SP-55-8, Detroit, 1978.
- /5.6.4./ Birkimer, D.L., D.R. Lankard, E.F. Fondriest and M.J. Snyder: The effects of exposure to elevated temperatures on time-dependent strains in concrete. ASME, First International Conference on Pressure Vessel Technology, Delft, Netherlands, September 29-October 2, 1969.
- /5.6.5./ Boy, M.L.: Contribution to the study of thermal treatments of concretes (In French with English summary). France Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Cahier 422, pp 13, Paris, Dec. 1961.
- /5.6.6./ Crispino, E.: Studies of technology of concretes under thermal conditions. AGIP Nuclear S.P.A., Milan, 1970.
- /5.6.7./ Fischer, R.: Über das Verhalten von Zementmörtel und Beton bei höheren Temperaturen (Concerning the performance of cement mortar and concrete at higher temperatures). Mitteilung aus dem Institut für Massivbau, Heft 14, Darmstadt, 1967.
- /5.6.8./ Hansen, T.C., and L. Eriksson: Temperature change effect on behaviour of cement paste, mortar and concrete under load. ACI-Journal, Proceedings Vol. 63, pp. 489 - 504, April 1966.
- /5.6.9./ Maréchal, J.C.: Contribution à l'étude des propriétés thermiques

et mécaniques du béton en fonction de la température (Contribution to the studies of thermal and mechanical properties of concrete as a function of temperature). Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics., Octobre 1970.

/5.6.10./ Neville, A.M.: Properties of concrete. (Section: Thermal properties of concrete). Sir Isaac Pitman & Sons, London, 1963.

/5.6.11./ Purkiss, J.A.: A study of the behaviour of concrete heated to high temperatures under restraint and compressive loading. University of London, Ph. D. Thesis, 1972.

/5.6.12./ Schneider, U.: Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions. Fire & Materials, 1 (3), pp. 103 - 115, 1976.

/5.6.13./ Schneider, U., and K. Kordina: On the behaviour of normal concrete under steady state and transient temperature conditions. 3rd Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Techn., Vol. 3, Part H, Paper 1/6, London, 1975.

/5.6.14./ Schneider, U. et al.: Ursachen und Auswirkungen der Entfestigung von Beton bei hoher Temperatur (Strength losses of concrete at high temperatures - cause and effects). Mitteilungsblatt für die amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, Jahrg.18/19, S.50-57, Clausthal-Zellerfeld, 1979.

/5.6.15./ Schneider, U.: Ein Beitrag zur Klärung des Kriechens und der Relaxation von Beton unter instationärer Temperatureinwirkung (Creep and relaxation of concrete under transient temperature conditions). Forschungsbeiträge für die Baupraxis. Verlag W.Ernst & Sohn, Berlin, S. 133 - 149, 1979.

/5.6.16./ Schneider, U. et al.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton (High temperature properties of solid concrete). Research Report 1979/80, Part II, Project B3, SFB 148, Techn. University Braunschweig, 1980.

/5.6.17./ Schneider, U.: Creep effects under transient temperature conditions. Symposium: Recherche fondamentale sur le retrait et fluage du béton Preprint, page 249/260, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1980.

/5.6.18./ Sullivan, P.J., Khoury, and B.L. Graniger: Strain behaviour under uniaxial compression of three concretes during first heating to 600°C. 6th Int. Conf. SMIRT, paper H 1/3, Paris, 1981.

/5.6.19./ Weigler, H., and R. Fisher: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen (Behaviour of concrete at elevated temperatures). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 64 Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1964.

## 5.7. Zugfestigkeit und Torsion

### 5.7.1. Zugbeanspruchung

Die Hochtemperaturzugfestigkeit von Beton ist in einer begrenzten Zahl von Arbeiten behandelt. Am häufigsten wurde die Spaltzugfestigkeit untersucht. Fast alle Versuchsdaten beziehen sich auf Ergebnisse im "Kalten", die nach Wiederabkühlung von beheizten Proben auf die Umgebungstemperatur gewonnen wurden. Einige Daten wurden jedoch auch bei den hohen Versuchstemperaturen gewonnen. Die folgenden Versuchsparmeter wurden bisher untersucht:

- Betonmischung,
- Betonzuschlag,
- Aufheizrate,
- Restzugfestigkeit.

Aus den vorliegenden Meßwerten lassen sich folgende Aussagen gewinnen (s. Bild 5.7.1. und 5.7.2.).

- Das Mischungsverhältnis beeinflusst die Hochtemperaturzugfestigkeit und auch die Restfestigkeit. "Magere" Betone mit geringem Zementgehalt weisen vergleichsweise kleinere Festigkeitsminderungen auf als "fette" Betone.
- Der Betonzuschlag hat großen Einfluß auf die Zugfestigkeit. Die beiden Hauptgruppen - Kalkstein und Quarzkies - verhalten sich unterschiedlich. Vorliegende Versuchsdaten haben ergeben, daß der Festigkeitsverlust von Kalksteinbeton bei 500°C etwa doppelt so groß ist, wie bei Kiesbeton. Betone mit verschiedenen Arten von Silikatzuschlägen weisen untereinander keine Unterschiede auf.
- Die Aufheizrate hat wenig Einfluß auf die Zugfestigkeit.
- Die Restzugfestigkeit ist etwas niedriger als die Hochtemperaturzugfestigkeit. Sie ist relativ geringer als die Restdruckfestigkeit.

## 5.7. Tensile strength and torsional loading

### 5.7.1. Tension

A limited number of publications have considered the high temperature tensile strength of concrete. Mostly test were carried out using the cylinder splitting test method. Nearly all the data have been derived in the cold state after cooling to ambient temperatures. Some data are available from tensile splitting tests performed at high temperatures. The following main features have been investigated:

- mix proportion,
- type of aggregate,
- rate of heating,
- residual tensile strength.

From the present data it can be stated (see figs. 5.7.1. and 5.7.2.):

- The mix proportion affects the high temperature tensile strength and also the residual tensile strength in so far as the relative reductions were somewhat lower for concretes of lower original compressive strength, i.e. lean concretes with lower cement content indicate lower reductions in strength.
- The type of aggregate has a significant influence on tensile strength. The two main groups of aggregates - siliceous and calcareous aggregate - are different. The data indicate that the decrease in tensile strength of calcareous aggregate concrete is twice as high as siliceous aggregate concrete at 500°C. Concretes made with different kinds of siliceous aggregates indicate no difference in behaviour.
- The rate of heating has minimal effects on the tensile strength.
- The residual tensile strength is somewhat lower than the tensile strength at elevated temperatures. It is relatively lower than the residual compressive strength.

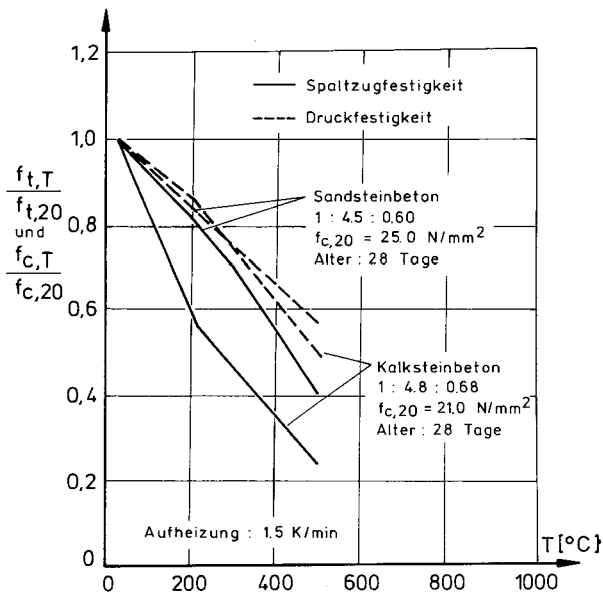


Bild 5.7.1 : Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit von verschiedenen Betonen nach der Abkühlung nach Harada (persönl. Mitteilung)

Fig. 5.7.1 : Split cylinder tensile strength and compressive strength of different concretes after cooling according to Harada (private communication)

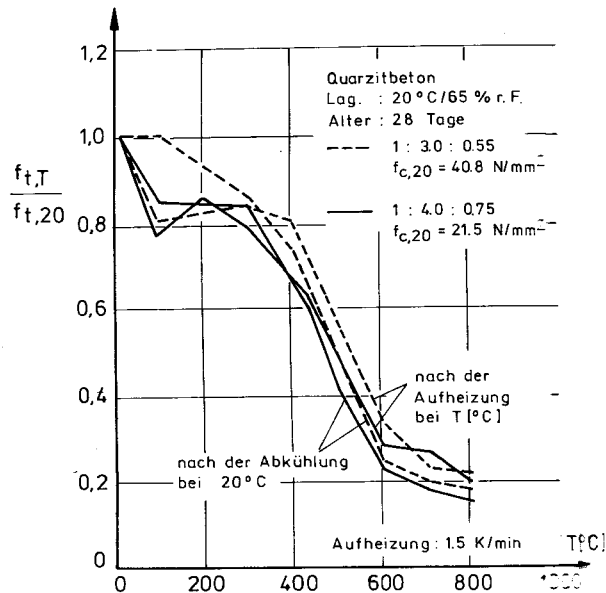


Bild 5.7.2 : Spaltzugfestigkeit von Normalbeton im "warmen" und im "abgekühlten" Zustand nach /5.7.5./

Fig. 5.7.2 : Split cylinder tensile strength of normal concrete in the "hot" state and after "cooling" according to /5.7.5./

- e) Die relativen Festigkeitsverluste bei hohen Temperaturen sind größer für Zugfestigkeiten als für Druckfestigkeiten.
- f) Die Wiedergewinnung an Zugfestigkeit bei Raumtemperatur ist nicht ganz geklärt. Nach Temperaturbeanspruchungen bei  $\geq 600^\circ\text{C}$ , führt eine anschließende Luftlagerung nicht zu Festigkeitsgewinnen, die wenigen vorliegenden Daten deuten sogar darauf hin, daß die Restfestigkeit nach wenigen Tagen der Nachlagerung gegen Null geht.

- e) The relative decrease in concrete strength with temperature is greater for tensile than for compressive strength.

- f) Concerning the recovery of tensile strength it can be stated, that storage under normal conditions after exposure to high temperatures  $\geq 600^\circ\text{C}$  does not improve the concrete strength. The little data available indicate that the tensile strength tends to zero after several days of storage.

#### 5.7.2. Torsionsbeanspruchung

Die Torsionseigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen wurden ebenfalls nur von wenigen Forschern untersucht. Die Ziele dieser Arbeiten beziehen sich im wesentlichen

#### 5.7.2. Torsion

Torsion of concrete at elevated temperature has been studied by a few workers. The aim of those investigations are closely related to the general problem of high temperature

auf allgemeine Fragen der Hochtemperaturverformungen von Beton. Bei Torsionsversuchen können Schwinderscheinungen von den übrigen Verformungsmessungen total getrennt werden. Dieses ist ein Vorteil, aber andererseits sind Torsionsverformungen nur von geringer praktischer Bedeutung, weil sich daraus keine Entwurfskennwerte für Beton ableiten lassen. Aus diesem Grunde wird auch auf eine weitere Diskussion der vorliegenden Versuchsergebnisse verzichtet. Detaillierte Informationen darüber sind in der angegebenen Literatur zu finden /5.7.1./und /5.7.4./.

deformations of concrete. In a torsion test the shrinkage of concrete can be completely excluded from the deformation measurements. This is an advantage but on the other hand torsion measurements are only of little practical relevance as torsion data do not belong to the design data of concrete. Therefore a further discussion of test results can be omitted. Detailed information may be found in the literature /5.7.1./and /5.7.4./, respectively.

### 5.7.3. Literatur                      Literature

/5.7.1./ Illston, J.M., and P.D. Sanders:  
The effect of temperature change upon the creep of mortar under torsional loading. Mag. of Concr. Research, Vol. 25, No.84, Sept. 1973.

/5.7.4./ Thelandersson, S.: Mechanical behaviour of concrete under torsional loading at transient high-temperature conditions. Lund Institute of Technology, Bulletin 46, 1974.

/5.7.2./ Marshall, W.T., and N.R. Tembe:  
Experiments on plain and reinforced concrete in torsion. Structural Engineer, London, Vol. 19, No. 11, pp. 177 - 191, Nov. 1941.

/5.7.5./ Thelandersson, S.: Effect of high temperatures on tensile strength of concrete. Lund Institute of Technology. Division of Struct. Mech. and Concrete Constr., Neostyled. pp 27, Lund, 1971.

/5.7.3./ Schneider, U.: Über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und die mechanisch-technologischen Auswirkungen (Thermal decomposition of concrete and the effects on concrete properties). Tonindustrie Zeitung, 101. Jahrg., p. 404 - 407, Coburg, 1977.

## 5.8. Verbundfestigkeit

### 5.8.1. Versuchsergebnisse

Die Verbundfestigkeit zwischen Beton und Stahl bei hohen Temperaturen wurde in den letzten Jahren ausführlich untersucht. In älteren Untersuchungen wurden die Betonproben zunächst auf Versuchstemperatur erwärmt, bei dieser Temperatur homogenisiert, anschließend wieder abgekühlt und bei Umgebungstemperatur im Ausziehversuch geprüft (Verbundrestfestigkeit). Heutzutage ist es üblich, die Ausziehversuche bei erhöhten Temperaturen auszuführen (Hochtemperaturverbundfestigkeit). Einen Überblick über die vorliegenden Versuchsergebnisse geben Bild 5.8.1. bis 5.8.7.. Folgende Versuchsparameter wurden bisher untersucht:

- Betonmischung,
- Betonzuschlag,
- Lagerungsbedingungen,
- Form, Durchmesser und Oberfläche des Betonstahls,
- Bewehrungsart,
- Probenform,
- Versuchsablauf.

Aus den veröffentlichten Ergebnissen sind die nachstehenden Schlußfolgerungen zu ziehen:

- a) Glatte und geformte Betonstähle weisen untereinander große Unterschiede auf (s. Bild 5.8.1. und 5.8.2.).
- b) Die Oberflächenrauigkeit von glatten Betonstählen beeinflusst die Hochtemperaturverbundfestigkeit deutlich. Oberhalb einer gewissen Rauigkeitsgrenze verhalten sich glatte Stähle ähnlich wie geformte Stähle (s. Bild 5.8.3. und 5.8.4.).
- c) Die Profilform ist von geringem Einfluß auf das Hochtemperaturverhalten solange die Rippenhöhe mehr als 0,2 mm beträgt.

## 5.8. Bond strength

### 5.8.1. Test results

The bond strength between concrete and steel at high temperatures has been intensively studied recently. In earlier investigations specimens were heated at various test temperatures, then held at these temperatures for a given period of time and thereafter cooled to ambient temperature when pull-out tests were performed (residual bond strengths). Today it is normal for pull-out tests to be carried out under the hot conditions pertaining to the experiment (high temperature bond strength). A review of test results is given in fig. 5.8.1. to 5.8.7.. The main features investigated up to now are:

- mix proportion,
- type of aggregate,
- curing conditions,
- shape of reinforcing bar, surface conditions, diameter of bar, bond length
- type of reinforcement,
- shape of specimen,
- testing procedure.

From the published data the following conclusions can be drawn:

- a) Great differences were observed between plain round bars and shaped bars (see fig. 5.8.1. and 5.8.2.).
- b) Surface roughness of plain round bars is the main factor affecting the high temperature bond strength. If a limiting roughness is exceeded plain round bars behave approximately like shaped bars (see fig. 5.8.3. and 5.8.4.).
- c) If a rib height of approximately 0,2 mm is exceeded, the influence of the shape of profile on the bond strength is of minor importance.

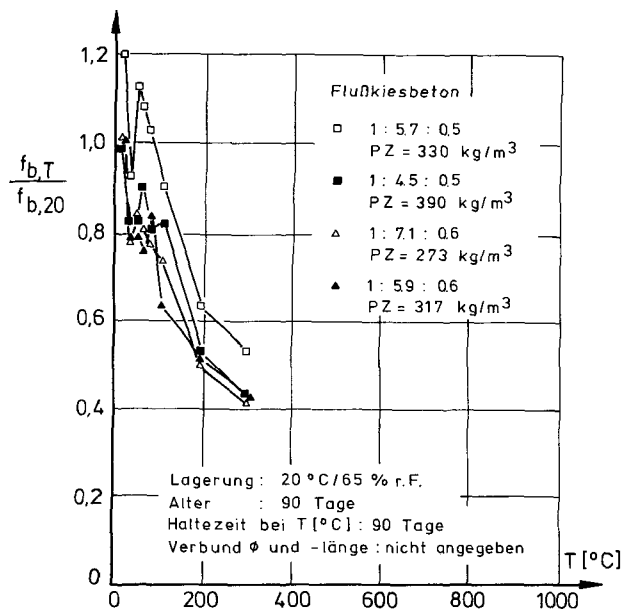


Bild 5.8.1 : Verbundrestfestigkeit von glattem Rundstahl in verschiedenen Betonmischungen nach /5.8.5./

Fig. 5.8.1 : Residual bond strength of plain round bars in different concrete mixes according to /5.8.5./

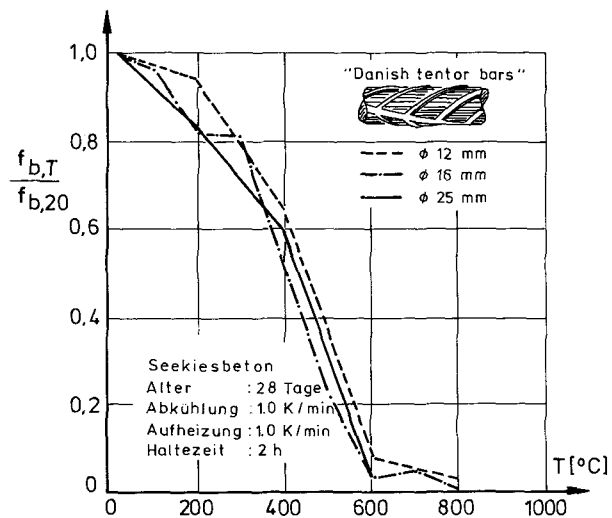


Bild 5.8.2 : Verbundrestfestigkeit von tordiertem (dänischem Tentor) Stahl nach /5.8.4./

Fig. 5.8.2 : Residual bond strength of Danish "tentor" bars according to /5.8.4./

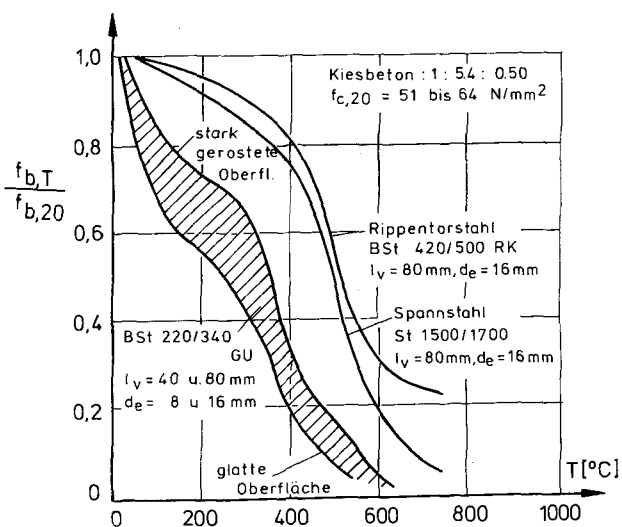


Bild 5.8.3 : Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf die Hochtemperaturverbundfestigkeit

Fig. 5.8.3 : Influence of the surface conditions on the high temperature bond strength

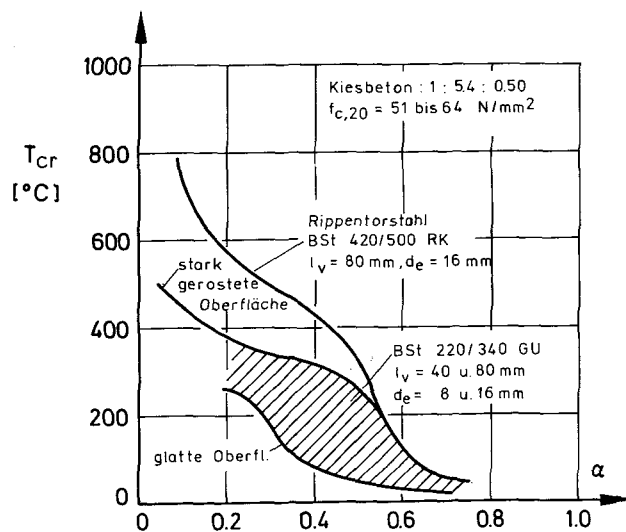


Bild 5.8.4 : Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf die kritische Verbundtemperatur nach /5.8.2./

Fig. 5.8.4 : Influence of the surface conditions on the critical bond temperature according to /5.8.2./

- d) Der Stahldurchmesser hat ebenfalls kaum Einfluß auf das Hochtemperaturverbundverhalten (s.Bild 5.8.5. und 5.8.6.).
- e) Die Einflüsse der Ausgangsfestigkeit sind nicht geklärt, die vorliegenden Ergebnisse widersprechen sich.
- f) Der Wasser/Zement-Wert hat nach den bisherigen Beobachtungen keinen nachweisbaren Einfluß.
- g) Die Zuschlagart hat den größten Einfluß auf die Hochtemperaturverbundfestigkeit. Je niedriger die thermische Dehnung des Betons, umso größer ist die Verbundfestigkeit bei hohen Temperaturen (s. Bild 5.8.7.).
- h) Die Lagerungsbedingungen sind wichtig soweit es den Temperaturbereich bis 400° C betrifft. Feucht gelagerte Proben zeigen vergleichsweise niedrigere Verbundfestigkeiten.

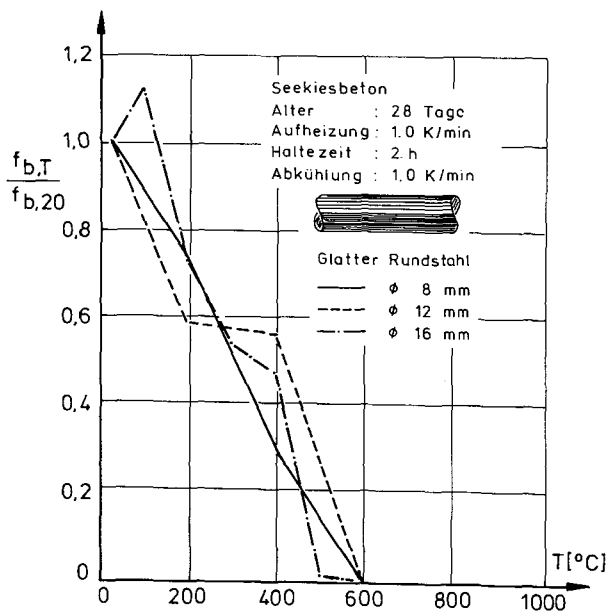


Bild 5.8.5 : Einfluß des Stahldurchmessers von glattem Betonstahl auf die Verbundfestigkeit nach /5.8.4./

Fig. 5.8.5 : Influence of the diameter of plain round bars on the residual bond strength according to /5.8.4./

- d) The diameter of the bars has little influence on the high temperature bond strength (see fig.5.8.5.and 5.8.6. .
- e) The influence of the original strength of concrete is erratic.
- f) A clear relation between water/cement ratio and bond strength has not been observed.
- g) The type of aggregate is the main factor determining the high temperature bond strength. The lower the thermal strain of concrete the higher the bond strength at elevated temperatures (see fig.5.8.7.).
- h) Curing conditions are important in so far as temperatures below 400°C are considered. Moist cured specimens have a lower bond strength.
- i) The type of heat treatment has an influence on the bond strength. The residual bond strength is always lower than bond strengths obtained from hot tests

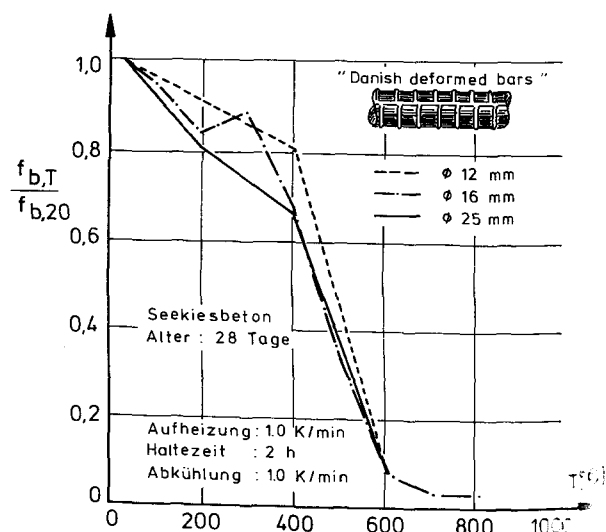


Bild 5.8.6 : Einfluß des Stahldurchmessers von verformtem Betonstahl auf die Verbundrestfestigkeit nach /5.8.4./

Fig. 5.8.6 : Influence of the diameter of deformed bars on the residual bond strength according to /5.8.4./



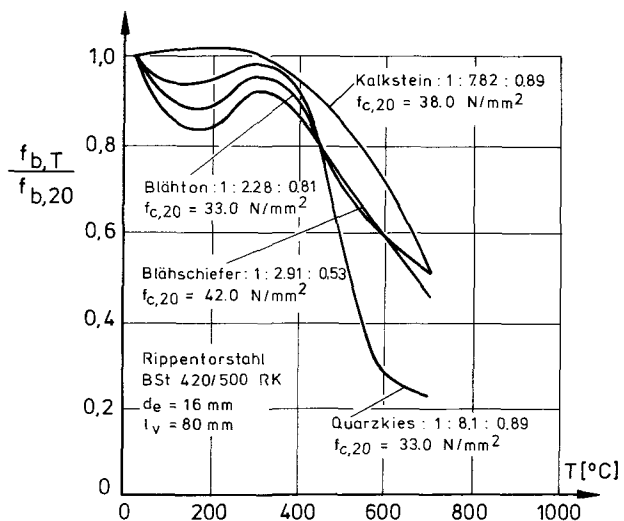
i) Die Art der Wärmebehandlung hat Einfluß auf das Verbundverhalten. Die Verbundrestfestigkeit ist in allen Fällen kleiner als die zugehörige Hochtemperaturverbundfestigkeit.

j) Die Verbundfestigkeit hängt deutlich von der Versuchsart und der Form der Ausziehprobe ab! Es soll diesbezüglich erwähnt werden, daß die absoluten Verbundfestigkeiten von Hertz /5.8.3./, die an konisch geformten Proben gewonnen wurden, etwa 2mal größer sind als vergleichbare Werte nach Diederichs /5.8.2./. Letzterer hat zylindrische Proben mit ebenen Endflächen verwandt.

j) The bond strength is significantly influenced by the test procedure and the shape of the specimens! It should be noted that the absolute values of bond strengths obtained from Hertz's (specimens with conical load bearing ends) are twice as high as the values obtained from Diederichs et al. (specimens with flat load bearing ends), see /5.8.3./ and /5.8.2./, respectively.

Bild 5.8.7 : Einfluß des Betonzuschlags auf die Hochtemperaturverbundfestigkeit nach /5.8.7./

Fig. 5.8.7 : Influence of the type of aggregate on the high temperature bond strength according to /5.8.7./



## 5.8.2. Literatur Literature

/5.8.1./ Diederichs, U., and U.Schneider: Bond strength at high temperatures. Magazine of Concrete Research. Vol. 33, No.115, pp. 75-84, June 1981.

/5.8.2./ Diederichs, U.: Untersuchungen zum Verbundverhalten bei hohen Temperaturen (Investigations on the bond strength at elevated temperatures). Dissertation, TU Braunschweig, eingereicht 1982.

/5.8.3./ Hertz, K.: Armeringsstols forankring ved høje temperaturer (Reinforcement bond at high temperatures). Instituttet for husbygning, Rapport nr. 138, Den polytekniske Laereanstalt, Danmarks tekniske

Højskole, Technical University of Denmark, DK - 2800 Lyngby, 1980.

/5.8.4./ Hertz, K.: Bond between concrete and deformed bars exposed to high temperatures. Institute of Building Design, Technical University of Denmark, DK - 2800 Lyngby. A paper presented at: CIB W 14 Meeting, Athens, May 19 - 23, 1980.

/5.8.5./ Kasami, H., T. Okuno and S. Yamane: Properties of concrete exposed to sustained elevated temperature. Transactions of the 3rd International Conference on "Structural Mechanics in Reactor Technology", London, 1.-5. Sept., Vol.3, paper H 1/5, 1975.

/5.8.6./ Milovanov, A.F., and G.D.Salmanov:  
Influence of high temperatures on  
the mechanical properties of rein-  
forcing steels and on bond strength  
between reinforcement and concrete.  
Issledovaniya po sharoupornym  
betonu i zhelezobetonu, p.203-223  
(in Russian), 1954.

/5.8.7./ Sager, H. et al.: Hochtemperatur-  
Verbundverhalten von Beton- und  
Spannstählen (High temperature  
behaviour of reinforcing and pre-

stressing steels). Sonderforschungs-  
bereich 148, Arbeitsbericht 1978-  
1980, Teil II, B 51 - 53, Techni-  
cal University of Braunschweig,  
1980.

/5.8.8./ Schneider, U., and U. Diederichs  
Verbundverhalten und Verbundfestig-  
keit bei hohen Temperaturen (Bond  
behaviour and bond strength at high  
temperatures). Betonwerk + Fertig-  
teil-Technik, Heft 6, p. 351-358  
Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1980.

## 5.9. Eigenschaften nach einer Tempera- tureinwirkung

### 5.9.1. Allgemeine Bemerkungen

Materialeigenschaften, die nach einer be-  
stimmten Temperatur- oder mechanischen Ein-  
wirkung ermittelt werden, heißen üblicher-  
weise "residuelle oder Resteigenschaften".  
In der vorliegenden Arbeit werden als "re-  
siduelle Eigenschaften" solche mechanischen  
Eigenschaften bezeichnet, die im kalten Zu-  
stand nach einer vorangegangenen Temperatur-  
beanspruchung an einer Betonprobe ermittelt  
werden. Zu Beginn der Hochtemperaturfor-  
schung an Beton wurden die meisten Betonei-  
genschaften auf die Weise bestimmt, so daß  
es eine Vielzahl von Veröffentlichungen auf  
diesem Gebiet gibt. Die wesentlichen Beton-  
eigenschaften, die dabei untersucht wurden,  
sind:

- Restdruck- und Restzugfestigkeit,
- Rest-E-Modul (residuelle Poissonzahl),
- Festigkeitsrückgewinn,
- Restdehnung,
- Verbundrestfestigkeit,
- residuelle Wärmeleitfähigkeit usw..

## 5.9. Residual properties

### 5.9.1. General remarks

Properties investigated after a certain tem-  
perature or mechanical treatment are usually  
called "residual properties". In the present  
survey "residual properties" means mechani-  
cal properties investigated in the cold  
state after a preceeding thermal exposure.  
In the beginning of experimental high tem-  
perature research most of the properties  
were measured by using these test methods  
and therefore numerous reports in this field  
of material research are available. The main  
concrete properties investigated are:

- residual compressive and tensile strength
- residual modulus of elasticity (residual  
Poisson's ratio),
- strength recovery,
- residual strain,
- residual bond strength,
- residual thermal conductivity etc.

Eine Reihe der angesprochenen Resteigenschaften ist bereits unter den entsprechenden Überschriften der vorhergehenden Abschnitte diskutiert worden. Der vorliegende Abschnitt behandelt somit ausschließlich folgende residuelle Eigenschaften:

- Restdruckfestigkeit,
- Festigkeitsrückgewinnung,
- Restverformung.

#### 5.9.2. Restdruckfestigkeit

Soweit es die Restdruckfestigkeit von Beton betrifft, wurden bisher folgende Parameter untersucht:

- Zementart,
- Betonzuschlag,
- Betonmischung,
- Betonalter,
- Wärmebehandlung (Aufheiz- und Abkühlbedingungen).
- Versuchsdurchführung.

Es muß beachtet werden, daß die Versuchsbedingungen, insbesondere die Abkühlbedingungen, die Haltezeit bei hoher Temperatur, die Probenversiegelung und die Lagerungsbedingungen nach der Beanspruchung für die Versuchsergebnisse von entscheidender Bedeutung sind. In den meisten Fällen ist es deshalb unvermeidlich, neben dem hier Gesagten, weitere Informationen aus den Originalarbeiten zu nehmen. Das Ergebnis einiger wesentlicher Versuchsergebnisse ist auf den Bildern 5.9.1. bis 5.9.3. zusammengestellt. Darüberhinaus zeigen Bild 5.2.1. und 5.2.3. Restfestigkeiten im Vergleich zur Hochtemperaturdruckfestigkeit. Aus diesen Daten und der zur Verfügung stehenden Literatur läßt sich allgemein folgern, daß die Restdruckfestigkeit durchweg kleiner ist als die zugehörige Festigkeit bei erhöhter Temperatur. Weiterhin lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- a) Betone mit unterschiedlichen Zementarten (PZ und HOZ mit 77% Hochofenschlacke) als Bindemittel weisen keine deutlichen Unterschiede auf (s.Bild 5.9.1.).

A number of these residual properties have already been discussed under the corresponding headings in the foregoing chapters. The present chapter deals exclusively therefore with the following residual properties:

- residual compressive strength,
- strength recovery,
- residual strain.

#### 5.9.2. Residual compressive strength

As far as residual compressive strength concerns the main features investigated are as follows:

- type of cement,
- type of aggregate,
- mix proportion,
- age of concrete,
- heat treatment (heating and cooling conditions),
- test procedure.

It must be kept in mind that the test conditions, especially the cooling conditions, the hold time period at high temperatures, the sealing conditions of the specimens and the recovery conditions prior to the tests are decisive in influencing the test results obtained. In most cases therefore it is indispensable to take further information from the original sources when evaluating the following statements. A survey of the main findings of the investigations are given in figs.5.9.1. to 5.9.3.. In addition fig. 5.2.1. and 5.2.3. show the residual strength in comparison to the high temperature strength. From these data and from the available literature it can be stated that the residual strength is generally lower than the compressive strength measured at high temperatures. Furthermore the following conclusions can be drawn:

- a) Concrete with various types of cement (PZ and HOZ containing 77 % blast furnace slag) indicate no significant differences (see fig. 5.9.1.).

b) Der Betonzuschlag hat scheinbar den größten Einfluß auf die Restdruckfestigkeit. Nach Abrams (s. Bild 5.2.3.) zeigen Kalksteinbetone die größten Festigkeitsminderungen bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Im Gegensatz dazu (s. Bild 5.9.2.) beobachtete Zoldners bis 400°C keine bedeutenden Festigkeitsverluste an Kalksteinbeton. Weiterhin ermittelte er für Sandstein- und Quarzkiesbeton in diesem Temperaturbereich Festigkeitsergüsse. Aus japanischen Messungen geht folgendes hervor: Sandstein- und Basaltbetone zeigen bedeutend geringere Festigkeitsverluste als Kalkstein-, Andesit- und Serpentinbetone. Den zitierten Versuchen liegen relativ lange Temperatur-Bearbeitungsdauern von 90 Tagen zugrunde.

b) The type of aggregate seems to have the main influence on the residual compressive strength. But the data from different sources indicate great variations. According to Abrams (see fig. 5.2.3.) carbonate aggregate concrete shows the highest reduction in strength, at relatively low temperatures. In contrast to that Zoldners (see fig. 5.9.2.) observed up to 400°C no significant loss of strength for limestone aggregate concrete. Furthermore he observed an increase of strength for sandstone and gravel aggregate concrete in this temperature region. From measurements made in Japan the following tendencies were deduced: Sandstone and basalt aggregate concretes indicate significant smaller reductions in strength than limestones, andesite and serpentine concretes. It should be mentioned that comparatively long exposure periods (90 days) were used in the test referred to.

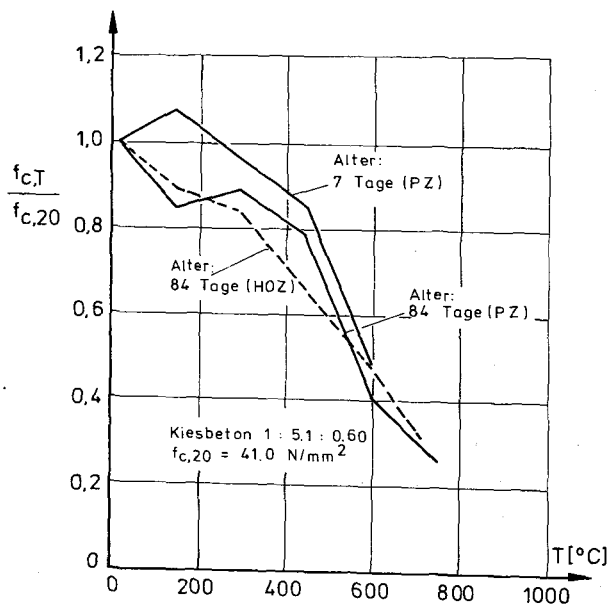


Bild 5.9.1 : Einfluß der Zementart und des Alters auf die Restdruckfestigkeit von Beton nach /5.9.10./

Fig. 5.9.1 : Influence of the type of cement and the age on the residual compressive strength of concrete according to /5.9.10./

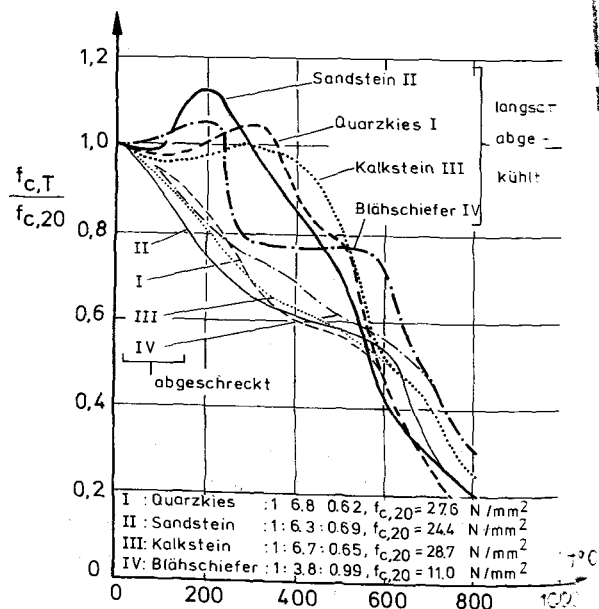


Bild 5.9.2 : Einfluß des Zuschlags und der Abkühlbedingungen auf die Restdruckfestigkeit von Beton nach /5.9.13./

Fig. 5.9.2 : Influence of the type of aggregate and cooling conditions on the residual compressive strength of concrete according to /5.9.13./

c) Das Betonalter ist wichtig, weil bei unvollständiger Hydratation des Betons bis 400° C ein Festigkeitsgewinn durch eine thermisch beschleunigte Nachhydratation auftreten kann.

d) Die Wärmebehandlung, insbesondere die Abkühlbedingungen, sind für Temperaturen bis 600° C von Bedeutung. Das Abschrecken heißer Betonproben in Wasser führt zu 40% niedrigeren Restfestigkeiten als das langsame Abkühlen im Versuchsofen (s.Bild 5.9.2.).

Die Festigkeitsrückgewinne von Beton einer vorhergehenden Wärmeeinwirkung wurden vielfach untersucht. Wesentliche Gesichtspunkte in den Untersuchungen waren:

- Zementart,
- Betonzuschlag,
- Lagerungsbedingungen nach der Abkühlung,
- maximale Versuchstemperatur.

Zusammenfassend läßt sich anhand der vorliegenden Literatur sagen:

a) Die Zementart hat großen Einfluß auf Festigkeitsrückgewinne. PZ-Beton zeigt einen deutlich geringeren Rückgewinn als HOZ-Beton, sofern die Proben nach der Wärmeeinwirkung unter Wasser gelagert werden. Nach Weigler et al. zeigt HOZ-Beton nach 7 Tagen Wasserlagerung einen deutlichen Festigkeitsgewinn, d.h., daß die ursprünglichen Werte, die nach dem Abkühlen bestimmt wurden durchweg wieder erreicht bzw. überschritten werden.

b) Der Betonzuschlag hat ebenfalls großen Einfluß auf die Festigkeitsrückgewinne. Leichtbeton zeigt im allgemeinen geringere Festigkeitsverluste als Normalbeton. In gleicher Weise zeigt er auch die geringsten Festigkeitsrückgewinne. Zwischen Betonen mit Quarzit- und Barytzuschlägen konnten keine Unterschiede festgestellt werden /5.9.10./. Unter den meisten Versuchsbedingungen ist der Eintritt eines Festigkeitsrückgewinns nach 2 bis 3 Tagen wahrscheinlich.

c) The age of concrete is important in so far as the relative incomplete hydration of the concrete may indicate a strength increase for temperatures up to 400°C due to accelerated hydration effects.

d) The heat treatment, especially cooling conditions, are for temperatures up to 600°C, of great importance. Quenching of hot specimens from the furnace in water, in comparison to slow cooling leads to about 40% lower residual strength values of the fast cooled concretes (see fig. 5.9.2.).

Strength recovery after a certain heat exposure has been investigated many times. The main features of these investigations were:

- type of cement,
- type of aggregate,
- storage conditions after cooling, prior to the tests,
- maximum temperature level.

Summarizing the literature it can be stated:

a) The type of cement is of great influence on the recovery of strength. PZ-concrete shows a substantially lower recovery than blast furnace slag cement concrete if specimens after the heat treatment are stored under water. According to Weigler et al. blast furnace slag cement concretes showed after ~ 7 days storage under water a regain in strength exceeding the original strength measured immediately after cooling.

b) The type of aggregate has a great influence on strength recovery too. Lightweight aggregate concretes generally indicate a smaller decrease in high temperature strength compared to normal concretes. Furthermore they show generally the lowest recovery of strength. With siliceous and barytic aggregate concretes no differences were observed /5.9.10./. Under most conditions after the first 2-3 days a recovery of strength is likely to occur.

c) Aus den meisten Literaturstellen geht hervor, daß die Probenlagerung nach der Abkühlung der Hauptfaktor für den Rückgewinn ist. Wenn eine Probe nach der Abkühlung an Luft bei 20°C gelagert wird, ist in den ersten 3 Tagen eine weitere Festigkeitsminderung zu erwarten. HOZ-Betone verlieren nicht soviel an Festigkeit wie PZ-Betone. Sofern sich an die thermische Behandlung eine Wasserlagerung anschließt, ist die größte Festigkeitsminderung bereits nach 1 Tag zu beobachten. Nach Durchlaufen dieses Festigkeitsminimums kann eine Periode des Festigkeitsrückgewinns einsetzen, wobei die Festigkeitswerte, die gleich nach der Abkühlung gemessen wurden nach 7 bis 28 Tagen Nachlagerung wieder erreicht werden (s. Bild 5.9.3.).

d) Die maximale Versuchstemperatur beeinflusst den Festigkeitsrückgewinn insoweit, als nach Beanspruchungen oberhalb 600°C keine Rückgewinne mehr auftreten, sofern herkömmliche Zementtypen zur Anwendung kommen.

### 5.9.3. Restverformungen nach der Abkühlung

Eine weitere wichtige Materialeigenschaft sind die sogenannten Restverformungen des Betons nach Wiederabkühlung und Erreichen der Ausgangstemperatur. Mittels Verformungsmessungen lassen sich spezielle Erkenntnisse über irreversible Phänomene, z.B. Rißentwicklung, chemische Reaktionen und Phasenumwandlungen gewinnen. Die wesentlichen Parameter, die bisher untersucht wurden, sind:

- Zementart,
- Betonzuschlag,
- Zuschlaggröße,
- Wassergehalt.

Anhand der vorliegenden Daten kann ganz allgemein gesagt werden, daß nach einer Erwärmung und anschließender Abkühlung von Beton eine beachtliche Restverformung vorhanden ist. Der Vorgang der irreversiblen Verformungsbildung bei unbelasteten Proben ist

c) From most references it becomes apparent that the main factor affecting the recovery of concrete is the storage condition after cooling. If the specimen after cooling was stored in air at 20°C then at first a further loss of strength occurs. The maximum decrease was observed during the first 3 days. The strength of concretes made with blast furnace cement did not decrease as much as that of portland cement concretes. If the thermal treatment is followed by storage of the specimen under water, the highest loss of strength occurs after one day. After having attained a minimum value a period of strength recovery may be observed, whereby the residual strength which was observed just after cooling will be exceeded after 7 - 28 days of storage (see fig. 5.9.3.).

d) The maximum test temperature influence the strength recovery in so far as with exposures at very high temperatures (above ~600°C) there is no strength recovery when common types of cement are used.

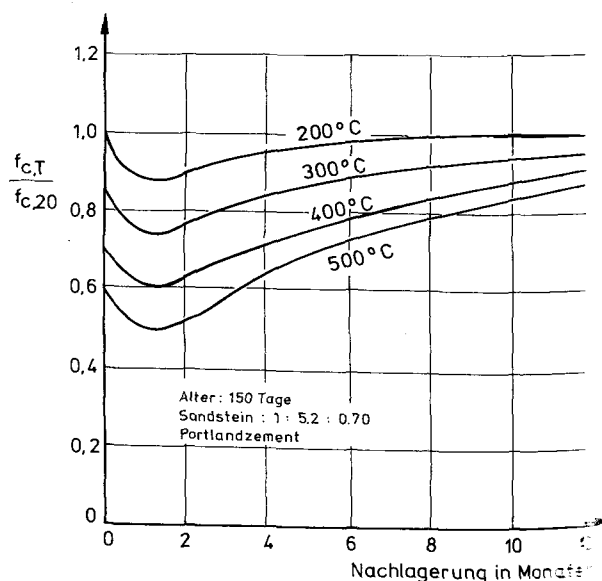


Bild 5.9.3 : Einfluß der Nachlagerung auf die Restdruckfestigkeit von Beton nach /5.9.6./

Fig. 5.9.3 : Influence of storing after temperature exposure on the residual compressive strength of concrete according to /5.9.6./

bisher nicht vollständig geklärt. Weitere Forschungen sind diesbezüglich erforderlich. Wichtige Faktoren, die bisher erkannt wurden, sind:

- a) Größe und Art des Betonzuschlags: Wie Bild 5.9.4. zeigt weisen Zementmörtel mit Normalsand zwischen 200 und 900°C nach der Abkühlung durchweg Reststauchungen auf. Dieses hängt vor allem mit dem Schrumpfen des Zementsteins zusammen. Im Gegensatz dazu, zeigen Kalkstein- und Quarzkiesbetone in diesem Temperaturbereich bleibende Restdehnungen, welche durch Rißbildung verursacht werden.
- b) Zementart: Der Einfluß von PZ und HOZ auf die Restverformungen sind ungefähr gleich. Die Restverformung von PZ-Mörtel ist etwas geringer als von HOZ-Mörtel (s. Bild 5.9.4.).
- c) Zuschlagart: Erhebliche Unterschiede in den Restverformungen zeigen Leichtbetone und Normalbetone. Normalbetone weisen nach Abkühlung von 300 bis 900°C durchweg bleibende Dehnungen auf. In dem

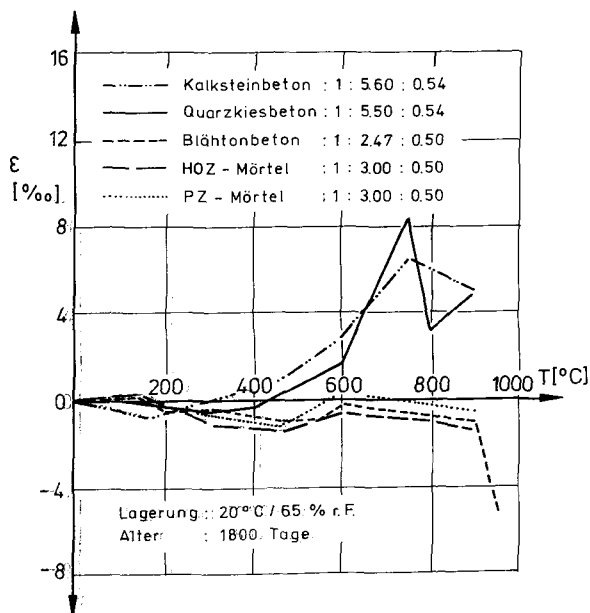


Bild 5.9.4 : Restverformung von verschiedenen Betonen und Zementmörteln nach der Abkühlung

Fig. 5.9.4 : Residual strain after cooling of different concretes and cement mortars

### 5.9.3. Residual strains after cooling

Another important material property are the residual strains of concrete after thermal exposure. With strain measurements special information on irreversible phenomena, e.g. development of cracks, chemical reactions and phase transformations may be obtained. The main features which were investigated are:

- type of cement,
- type of aggregate,
- size of aggregate and
- water content.

From the data analyzed it can be generally stated that after a period of heating and cooling of concrete a considerable amount of permanent strain is present. The process of development of irreversible strains with unloaded specimens is not yet fully understood. Further investigations are needed for the explanation of the basic phenomena. Important factors which are known at present are:

- a) Size and type of aggregates: As indicated in fig. 5.9.4. mortars made with siliceous sand show mostly a residual shortening, analogous to cement stone, in the temperature range 200 - 900°C. This is due to the effect of shrinkage. In contrast, siliceous and limestone concretes indicate a residual expansion in this temperature range which is caused by the development of cracks.
- b) Type of cement: The residual strain of blast furnace slag cement and portland cement show the same tendencies. The residual shrinkage of portland cement mortar seems to be somewhat lower than that of blast furnace slag cement (s.fig. 5.9.4.).
- c) Type of aggregate: Considerable differences in the residual strain values are to be observed between lightweight aggregate and normal weight aggregate concretes. Normal weight aggregate concretes

gleichen Temperaturbereich zeigen Leichtbetone bleibende Stauchungen (s. Bild 5.9.4.).

- d) Wassergehalt: Der Wassergehalt beeinflusst die Restverformungen nur im Temperaturbereich von 20 bis 300°C. Allgemein läßt sich sagen, daß die bleibenden Schwindstauchungen mit zunehmendem Wassergehalt ansteigen.
- e) Hydratisierter Zementstein zeigt im gesamten interessierenden Temperaturbereich bleibende Stauchungen.
- f) Die Art der Belastung während der Aufheizung und/oder Abkühlung beeinflusst die Restverformungen erheblich (s. Abschnitt 5.6.).

usually indicate residual expansion in the temperature region 300 - 900° C. In contrast lightweight aggregate concretes indicate a shortening in this temperature region (s.fig. 5.9.4.).

- d) Water content: The water content affects the residual strain only at temperatures up to 300°C. Generally one can say, that the higher the original water content the higher the residual shrinkage.
- e) Hydrated cement paste indicates residual shrinkage over the whole temperature range.
- f) Type of loading during heating and for cooling influences the residual strains significantly (s. Section 5.6.).

#### 5.9.4. Literatur\*) Literature\*)

- /5.9.1./ Bessey, G.E.: Visible changes in concrete or mortar exposed to high temperatures. Investigation of Building Fires. HMSO.
- /5.9.2./ Crook, M.: Regain of strength after firing of concrete. Magazine of Concrete Research; Vol. 22; No. 72, pp. 149 - 154, 1970.
- /5.9.3./ Day, F., K. Sosmann und L. Hostetter: Gesteine in höherer Temperatur (Aggregates at high temperatures). Neues Jahrbuch der Geol. u. Mineral., Beilage Bd. 40, 1916.
- /5.9.4./ Dougill, J.W.: An investigation into the residual compressive strength of concrete after exposure to high temperature. M.Sc. Thesis, University of London, 1960.

- /5.9.5./ Gantvoort, G.J.: The mechanical properties of concrete; during and after a fire. TNO-Report No. B I-78-60/62.1.3210, Delft, Oct. 1978.
- /5.9.6./ Harada, T.: Thermal character of concrete. Japan, Tokyo Institute of Technology. Neostyled. pp. 5. Tokyo, 1962.
- /5.9.7./ Harmathy, T.Z.: Determining the temperature history of concrete constructions following fire exposure. ACI-Journal, Title No. 65 - 73, S. 959/964, 1968.
- /5.9.8./ Kordina, K.: Über das Brandverhalten von Bauteilen und Bauwerken (The behaviour of structural elements and buildings under fire. Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Nr. 281, deutscher Verlag, 1979.

\*) Anmerkung : Siehe auch Abschnitt 5.2.2.

Author's note : See also Section 5.2.2.



/5.9.9./ Lankard, D.R., D.L. Birkhimer, E.F. Fondriest and M.J. Snyder: Effects of moisture content on the structural properties of Portland cement concrete exposed to temperatures up to 500° F (261°C). Symposium on effects of temperature on properties of concrete, SP-25, pp 59 - 102, ACI, Detroit 1971.

/5.9.10./ Weigler, H.; R. Fischer: Influence of high temperature on strength and deformations of concrete. ACI H. Spec. Publ. SP-34, Vol. II, p. 481 ff, Detroit, 1972.

/5.9.11./ Weiß, R., und U. Schneider: N<sub>2</sub>-Sorptionsmessungen zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche und

der Porenverteilung von erhitztem Normalbeton (N<sub>2</sub>-absorption measurements for determination of specific surface and the pore distribution of heated normal concrete). Bericht aus dem Sonderforschungsbe- reich 148, TU Braunschweig, 1976.

/5.9.12./ Zenkov, N.I.: Building materials and its behaviour in condition of fire. High fire-technical, USSR school. Moscow, 1974.

/5.9.13./ Zoldners, N.G.: Effect at high temperatures on concrete incor- porating different aggregates. Proc. American Society for Testing Materials 60, p. 1087 - 1108, 1960.

## 5.10. Abplatzungen

### 5.10.1. Versuchsergebnisse

Explosionsartige Abplatzungen bei Beton- bauteilen treten vor allem unter Feuer- einwirkung auf. Abplatzungen wurden viel- fach beobachtet und zahlreiche Bauteil- versuche sind durchgeführt worden, um ihr Auftreten zu studieren und zu erklären. Im Hinblick auf den Inhalt dieses Berichtes sind Abplatzungen eher als Bauteileigen- schaft denn als Materialeigenschaft zu ver- stehen. Mit Rücksicht auf die Bedeutung des Abplatzproblems, insbesondere für die Feuer- widerstandsdauer von Betonkonstruktionen, wird es hier jedoch behandelt. Entsprechend den vorliegenden Ergebnissen aus Brandunter- suchungen können Abplatzungen in 4 Katego- rien eingeteilt werden:

a) Zerstörende Abplatzungen - explosionsar- tiges Abplatzen von Betonstücken aus den Bauteiloberflächen.

## 5.10. Spalling

### 5.10.1. Test results

Explosive spalling of concrete occurs es- pecially under the action of fire. It has been observed many times, and numerous tests on constuctional elements have been per- formed to study this problem and to get a more or less "complete" picture of this phenomenon. In the context of this report it should be noted that spalling is rather a phenomenon of constructional elements than a concrete property. However, because of the great importance of the spalling with respect to the fire endurance of struc- tual members it has been considered. From the results of fire tests spalling can be subdivided into four categories:

a) Destructive spalling - explosive spalling of a few large pieces of concrete from the surface of the member.

- b) Örtliche Abplatzungen - örtlich begrenzte Zerstörung von Oberflächen oder Ecken durch Abplatzen.
- c) Schrittweises Abplatzen - schrittweise Zerstörung von Querschnitten durch Abplatzung insbesondere bei Leichtbetonen und sehr hohen Temperaturen.
- d) Abfallen - Verlust von Oberflächenstücken durch Abfallen unter Eigengewicht.

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen geht hervor, daß das Abplatzen von folgenden Effekten beeinflusst wird:

- Temperaturanstieg des Feuers,
- Feuchtegehalt des Betons,
- Druckspannung im Bauteil,
- mineralogischer Charakter der Zuschläge,
- Temperaturspannungen,
- Bewehrung des Bauteils.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurden bisher folgende Parameter untersucht:

- verschiedene Betone (Mischung, Zuschlag, Lagerung),
- verschiedene Aufheizbedingungen (ein- und zweiseitige Beheizung),
- Dicke, Form und Größe der Betonbauteile,
- Beanspruchung und Vorspannung,
- Gehalt und Durchmesser der Bewehrung.

Ein wesentliches Versuchsergebnis über Abplatzungen ist auf Bild 5.10.1. angegeben. Daraus und aus der vorliegenden Literatur läßt sich folgendes ableiten:

- a) Der Feuchtegehalt ist eine der Hauptursachen für das Abplatzen. Bei Abwesenheit von Feuchte treten zerstörende Abplatzungen nicht auf. Steigender Feuchtegehalt erhöht die Abplatzgefahr. Die Feuchteverteilung ist von untergeordnetem Einfluß.
- b) Die Aufheizbedingung ist ebenfalls eine wesentliche Einflußgröße. Je höher die Aufheizrate, umso größer ist die Abplatzgefahr. Beidseitiges Beheizen erhöht die Abplatzgefahr infolge der rasch ansteigenden Dampfdrücke und der Dampfströmung.

- b) Local spalling - spalling of small piece of concrete from some particular points of the surface e.g. edges.
- c) Gradual spalling of a cross section - occurring mainly at very high temperature and with lightweight aggregate concrete.
- d) Sloughing off - loss of small pieces of concrete from the surface.

From tests it appears that spalling is closely related to the

- temperature increase under fire,
- moisture content of the concrete,
- compressive stress of the member,
- mineralogical constitution of the aggregate,
- temperature stresses,
- reinforcement of the member.

Therefore the main aspects which have been investigated are:

- different concretes (mix proportion, aggregate, curing conditions),
- different heating conditions (heating of one or more sides),
- thickness, shape and size of the concrete members,
- external load and prestressing level,
- content and size of reinforcement.

One of the main conclusions of spalling tests, which have been drawn, are shown in fig. 5.10.1.. From this figure and from the literature it can be stated:

- a) Moisture content is one of the main factors causing spalling. In the absence of moisture no destructive spalling occurs. Increasing moisture content increases the probability of spalling. Moisture distribution is of minor importance.
- b) The heating condition is also one of the major factors influencing spalling. The higher the heating rate the higher the probability of spalling. Heating from more than one side increases the probability of spalling due to the increase of pore pressure and fast vapour flow.

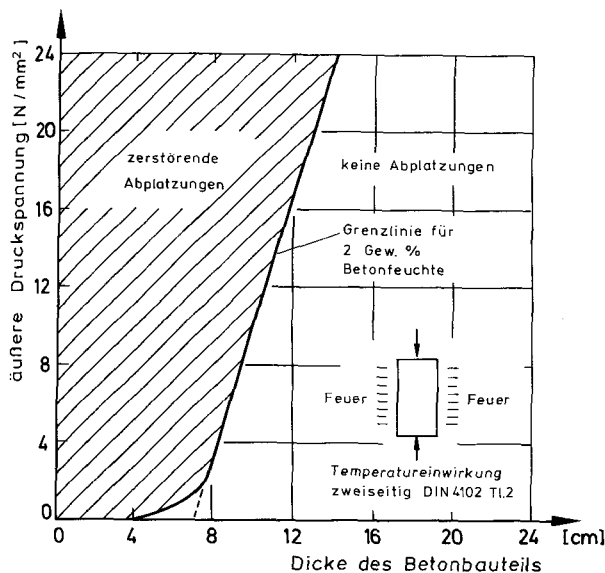


Bild 5.10.1 : Einfluß der Druckspannung und Bauteildicke auf das Abplatzen von zweiseitig beheiztem Beton nach /5.10.2./

Fig. 5.10.1 : Influence of the compressive stress and member thickness on the spalling of concrete elements heated from two sides according to /5.10.2./

- c) Druckspannungen oder Druckvorspannungen erhöhen die Abplatzgefahr. Üblicherweise treten Abplatzungen nur in der Druckzone von Betonbauteilen auf.
- d) Die Bauteildicke ist ebenfalls von Einfluß. Bei dicken Bauteilen sinkt die Abplatzgefahr.
- e) Die Bewehrung kann die Abplatzgefahr erhöhen. Bewehrungskonzentrationen in Bauteilecken begünstigen das Auftreten von Abplatzungen.
- f) Betonzuschläge wie Flint, Gneiss und Schiefer verursachen ein lokales oder schrittweises Abplatzen von Betonflächen, jedoch nur bei sehr hohen Temperaturen. Leichtzuschläge verhalten sich ähnlich.
- g) Das Mischungsverhältnis ist insoweit von Einfluß, als durch den Mischungsentwurf die Porenverteilung beeinflusst wird. Ansteigende Porosität und fallende Porenradien begünstigen das Auftreten von Abplatzungen.

- c) Compressive stresses due to external loading or prestressing increase the probability of spalling. Normally spalling occurs in the compression zone of structural members.
- d) Thickness of the member is important too. With thick members the probability of spalling decreases.
- e) Reinforcement may increase the risk of spalling. High concentrations of reinforcement in the corners of structural members favor the occurrence of spalling.
- f) Aggregates like flint, gneiss and slate cause local or gradual spalling but only at very high temperatures. Moist lightweight aggregates behave similarly.
- g) Mix proportions influence the effect of spalling through alternations in the pore size distributions. An increasing porosity and decreasing pore radius increase the risk of spalling.

#### 5.10.2. Literatur Literature

- /5.10.1./ Copier, J.: The spalling of normalweight and lightweight concrete on exposure to fire. Heron, Vol. 24, No. 2, 1979.
- /5.10.2./ Meyer-Ottens, C.: Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen (Spalling of structural concrete under fire). Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. Heft 248, 1975.
- /5.10.3./ Nekrasov, K.D., V.V. Zhukov and V.I. Shevchenko: Investigation of processes, which influence concrete spalling under exposure to heat. Proceedings of International Conference on Strength of Concrete. G.D.R., Dresden, 1963.

- /5.10.4./ Sertmehmetoglu, Y.: A mechanism of spalling of concrete under fire conditions. King's College, London, Ph.D. Thesis, 1977.
- /5.10.5./ Waubke, N.V., and U. Schneider: Tensile stresses in concrete due to fast vapour flow. Int. Symposium Pore Structure and Properties of Materials. Part III, Vol. V, p. 213/222, Prag, 1973.
- /5.10.6./ Zhukov, V.V.: Probability of concrete failure in fire. Con-

crete and Reinforced Concrete No. 8, 1978.

- /5.10.7./ Zhukov, V.V., and V.L. Veksien: Explosive spalling of concrete under fire exposure in high buildings. Proceedings of International Conference on High Buildings Pub. M., 1976.
- /5.10.8./ Zhukov, V.V.: Purpose of explosive spalling of concrete in fire. Concrete and Reinforced Concrete, No. 3, 1976.

## 6. Schlußbetrachtung

Der vorliegende Bericht behandelt das Hochtemperaturverhalten von Beton von 20° C bis zum Schmelzen. Ausgehend von den physiko-chemischen Erscheinungen, die bei einer Temperatureinwirkung auf Zementstein oder Beton auftreten können, wurde das gesamte Spektrum der makroskopischen physikalischen und mechanischen Temperatureigenschaften beschrieben. Dabei konnte auf eine umfangreiche Literatursammlung und auf eigene Forschungsergebnisse Bezug genommen werden.

Wichtige Erkenntnisse, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die physikalischen und chemischen Vorgänge beim Schmelzen von Beton sind nur näherungsweise bekannt, so daß alle thermischen Daten, die in der Nähe der Temperaturen des Schmelzbereichs ermittelt wurden, vergleichsweise unsicher erscheinen.
- Die physikalischen Eigenschaften und Kennwerte von Beton weisen durchweg große Streuungen auf. Die Streuungen sind nur teilweise materialspezifisch; ein bedeutender Einfluß aus der Versuchsordnung und den jeweiligen meßtechnischen Randbedingungen ist nicht auszuschließen.

## 6. Conclusion

This report describes the behaviour of concrete at temperatures from 20°C up to melting. Starting from the physical and chemical effects which occur in cement stone and concrete under temperature exposure the wide spectrum of the macroscopic physical and mechanical high temperature properties are discussed. Data from a comprehensive literature survey are employed as well as own experimental results.

Important findings of this study may be summarized as follows:

- The physical and chemical reactions during melting of concrete are not fully understood up to now. Thermal properties which are derived near the melting range are not very reliable.
- The physical properties and data of concrete indicate great variations. The variations reflect up to a certain extent only a specific material behaviour. A great deal of variations belongs to influences from the test arrangements and test procedures.

- Für die Ermittlung mechanischer Eigenschaften und Kennwerte sind die Versuchsbedingungen ebenfalls von grundlegender Bedeutung. Typische Versuchsabläufe und die zugehörigen Randbedingungen wurden zusammengestellt und diskutiert. Bei der Anwendung von Materialdaten im Bauwerk ist zu beachten, daß die in der Natur herrschenden Randbedingungen etwa den jeweiligen Versuchsbedingungen entsprechen, so daß die Übertragbarkeit der Daten gewährleistet ist. Dieses betrifft vor allem die stationären und instationären Kriechverformungen, die entweder im Reaktorbau (Langzeitproblem) oder im Brandfall (Kurzzeitproblem) zugrunde gelegt werden müssen.
- Nicht behandelt wurde der Feuchtetransport in Beton, weil darüber bereits einige gesonderte Berichte vorliegen. Es scheint jedoch erforderlich, daß dieses Problem bald auch unter dem Aspekt von Temperatureinwirkungen  $> 150^{\circ}\text{C}$  behandelt wird. Auswertbare Erkenntnisse über die Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen liegen nur sehr begrenzt vor.
- Soweit es die mechanischen Eigenschaften und Kennwerte von Beton betrifft, kann der Bericht nur Anhaltswerte für die praktische Anwendung liefern. Im konkreten Einzelfall wird man nicht grundsätzlich auf Zulassungs- und Anschlußversuche verzichten können.
- Im Hinblick auf die kritische Beurteilung einzelner Kennwerte und Daten sei darauf hingewiesen, daß sich die diskutierten Werte durchweg auf angegebene Literaturstellen beziehen. Ausführlichere Darstellungen und Begründungen sind in den Originalarbeiten zu finden.
- The determination of mechanical properties and data significantly depends on the specific test procedures. Typical test procedures and the related boundary conditions are described and discussed. The conversion of material properties into data for practical application requires a great deal of correspondence between the specific test condition and the practical situation of the individual member in mind. Especially steady state creep data and transient creep data must be distinguished. Steady state creep is a long term problem and it is related to PCRV design e.g., whereas transient creep belongs to short term problems as building fires respectively.
- Moisture transport in concrete was not discussed as there are a few separate reports available. Nevertheless it seems to be necessary for us to increase our efforts in this matter, especially in connection with high temperatures ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ). Our knowledge on the porosity and permeability of concrete at  $T > 150^{\circ}\text{C}$  is very limited up to now.
- As far as mechanical properties concerns the report may only provide some evidence of data for practical applications. In a specific practical case of great importance one must prove and testify the individual properties which will be employed in the design.
- With respect to the criticism of certain properties and data it should be noted that the discussion normally refers to the cited literature. For a detailed proof the original reports should be employed.

Der Verfasser ist sich bewußt, daß die Erstellung von Sachstandsberichten mit grundsätzlichen Problemen in der Darstellung verbunden ist. Die erforderliche Auslassung bestimmter Detailfragen und die Hinzunahme wichtig erscheinender Teilergebnisse, wird nicht in jedem Fall auf einhellige Zustimmung

The author realizes that a technical state of art report creates problems especially in connection with the type of representation of data. The omission of certain details and the addition of other important facts will not be agreed by other workers in any case. With respect to the large

mung stoßen. Aufgrund der einerseits vorliegenden umfangreichen Literaturergebnisse und der andererseits angestrebten Knappheit in der Darstellung war es besonders schwierig, eine ausgewogene Form der Berichterstattung zu finden. Sollte dies nicht in allen Punkten gelungen sein, so ist dieses sicherlich unbeabsichtigt und somit entschuldbar.

Der Verfasser hofft, daß sich aus dem Bericht für den Nichtspezialisten vielfältige Anregungen und Hinweise zum thermischen Verhalten des Betons ergeben, die auch in der Praxis Anwendung finden können. Dem Spezialisten mag er als Grundlage für vertiefende und weiterführende Forschungsarbeiten dienen.

amount of data on the one hand and the limited space for their representation on the other hand it was very difficult to find a fully balanced type of report. If this is not achieved in every point or chapter this is not intentional and may be excused.

The author believes that the non-specialist gets from the report a lot of stimulations and suggestions on the thermal behaviour of concrete, which may also be used in practice. The specialist may take it as a basis for scientifically extended research work.

*In der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton sind seit 1945 erschienen:*

- Heft 100:** Versuche an Stahlbetonbalken zur Bestimmung der Bewehrungsgrenze  
von Willy Gehler †, Hermann Amos † und Erich Friedrich  
Die Ergebnisse der Versuche und das Dresdener Rechenverfahren für den plastischen Betonbereich (1949)  
von Willy Gehler † vergriffen
- Heft 101:** Versuche zur Ermittlung der Rißbildung und der Widerstandsfähigkeit von Stahlbetonplatten mit verschiedenen Bewehrungsstählen bei stufenweise gesteigerter Last  
von Otto Graf † und Kurt Walz  
Versuche über die Schwellzugfestigkeit von verdrehten Bewehrungsstählen  
von Otto Graf † und Gustav Weil  
Versuche über das Verhalten von kalt verformten Baustählen beim Zurückbiegen nach verschiedener Behandlung der Proben  
von Otto Graf † und Gustav Weil  
Versuche zur Ermittlung des Zusammenwirkens von Fertigbauteilen aus Stahlbeton für Decken (1948)  
von Hermann Amos † und Walter Bochmann vergriffen
- Heft 102:** Beton und Zement im Seewasser (1950) u. weitere Ausgaben  
von Alfred Eckhardt und Walter Kronsbein 8,50 DM
- Heft 103:** Die n-freien Berechnungsweisen des einfach bewehrten, rechteckigen Stahlbetonbalkens (1951)  
von K. B. Haberstock vergriffen
- Heft 104:** Bindemittel für Massenbeton. Untersuchungen über hydraulische Bindemittel aus Zement, Kalk und Traß (1951)  
von Kurt Walz vergriffen
- Heft 105:** Die Versuchsberichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1951)  
von Otto Graf † vergriffen
- Heft 106:** Berechnungstabellen für rechtwinklige Fahrbahnplatten von Straßenbrücken (1952)  
von Hubert Rüschi 7. überarbeitete Auflage (1981) 60,— DM
- Heft 107:** Die Kugelschlagprüfung von Beton (1952)  
von Kurt Gaede vergriffen
- Heft 108:** Verdichten von Leichtbeton durch Rütteln (1952)  
von Kurt Walz vergriffen
- Heft 109:** SO<sub>3</sub>-Gehalt der Zuschlagstoffe (1952)  
von Kurt Gaede 6,— DM
- Heft 110:** Ziegelsplittbeton (1952)  
von Karl Charisius, Walther Drechsel und Alfred Hummel vergriffen
- Heft 111:** Modellversuche über den Einfluß der Torsionssteifigkeit bei einer Plattenbalkenbrücke (1952)  
von Gerhard Marten vergriffen
- Heft 112:** Eisenbahnbrücken aus Spannbeton (1953 u. 1961)  
von Rudolf Bühner 2. erweiterte Auflage 14,50 DM
- Heft 113:** Knickversuche mit Stahlbetonsäulen  
von Willy Gehler † und Alfred Hütter  
Festigkeit und Elastizität von Beton mit hoher Festigkeit (1954)  
von Otto Graf † vergriffen
- Heft 114:** Schüttbeton aus verschiedenen Zuschlagstoffen  
von Alfred Hummel und K. Wesche  
Die Ermittlung der Kornfestigkeit von Ziegelsplitt und anderen Leichtbeton-Zuschlagstoffen (1954)  
von Alfred Hummel 7,— DM
- Heft 115:** Die Versuche der Bundesbahn an Spannbetonträgern in Kornwestheim (1954)  
von Ulrich Giehrach und Christian Sättele 10,— DM
- Heft 116:** Verdichten von Beton mit Innenrüttlern und Rütteltischen, Güteprüfung von Deckensteinen (1954)  
von Kurt Walz vergriffen
- Heft 117:** Gas- und Schaumbeton: Tragfähigkeit von Wänden und Schwinden  
von Otto Graf † und Hermann Schöffler  
Kugelschlagprüfung von Porenbeton (1954)  
von Kurt Gaede vergriffen
- Heft 118:** Schwefelverbindung in Schlackenbeton (1954)  
von Adolf Stois †, Franz Rost, Helene Zinnert, Fritz Henkel 13,— DM
- Heft 119:** Versuche über den Verbund zwischen Stahlbeton-Fertigbalken und Ortbeton  
von Otto Graf † und Gustav Weil  
Versuche mit Stahlleichtträgern für Massivdecken (1955)  
von Gustav Weil vergriffen
- Heft 120:** Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone (1955)  
von Hubert Rüschi vergriffen

- Heft 121: Gas- und Schaumbeton: (1956)**  
 Versuche zur Schub sicherung bei Balken aus bewehrtem Gas- und Schaumbeton  
 von *Hubert Rüs ch*  
 Ausgleichsfeuchtigkeit von dampfgehärtetem Gas- und Schaumbeton  
 von *Hermann Sch äffler*  
 Versuche zur Prüfung der Größe des Schwindens und Quellens von Gas- und  
 Schaumbeton  
 von *Otto Gra f f* und *Hermann Sch äffler* vergriffen
- Heft 122: Gestaltfestigkeit von Betonkörpern**  
 von *Kurt Walz*  
 Warmzerrei ßversuche mit Spannstählen  
 von *Dannenberg, Deutschmann* und *Melchior*  
 Konzentrierte Lasteintragung in Beton (1957)  
 von *Wolfgang Pohle* 14,— DM
- Heft 123: Luftporenbildende Betonzusatzmittel (1956)**  
 von *Kurt Walz* vergriffen
- Heft 124: Beton im Seewasserr (1956)**  
 (Ergänzung zu Heft 102) von *Alfred Hummel* und *K. Wesche* 5,— DM
- Heft 125: Untersuchungen über Federgelenke (1957)**  
 von *Karl Kammüller* und *Ottfried Jeske* vergriffen
- Heft 126: SO<sub>2</sub>-Gehalt der Zuschlagstoffe — Langzeitversuche**  
 (Ergänzung zu Heft 109) von *Kurt Gaede*  
 Eindringtiefe von Beton in Holzwolle-Leichtbauplatten (1957)  
 von *Kurt Gaede* 10,— DM
- Heft 127: Witterungsbeständigkeit von Beton (1957)**  
 von *Kurt Walz* 9,— DM
- Heft 128: Kugelschlagprüfung von Beton (1957)**  
 (Einfluß des Betonalters)  
 von *Kurt Gaede* vergriffen
- Heft 129: Stahlbetonsäulen unter Kurz- und Langzeitbelastung (1958)**  
 von *Kurt Gaede* 24,— DM
- Heft 130: Bruchsicherheit bei Vorspannung ohne Verbund (1959)**  
 von *Hubert Rüs ch, Karl Kordina, Coelestin Zelger* 10,— DM
- Heft 131: Das Kriechen unbewehrten Betons (1958)**  
 von *Otto Wagner* vergriffen
- Heft 132: Brandversuche mit starkbewehrten Stahlbetonsäulen**  
 von *Horst Seekamp*  
 Widerstandsfähigkeit von Stahlbetonbauteilen und Stahlsteindecken bei Bränden  
 von *Max Hannemann* und *Heinrich Thoms* (1959) 17,— DM
- Heft 133: Gas- und Schaumbeton: (1959)**  
 Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Gasbeton nach verschiedener Lagerung  
 von *Hermann Sch äffler*  
 Über die Tragfähigkeit von bewehrten Platten aus dampfgehärtetem Gas- und  
 Schaumbeton  
 von *Hermann Sch äffler*  
 Untersuchung des Zusammenwirkens von Porenbeton mit Schwerbeton bei be-  
 wehrten Schwerbetonbalken mit seitlich angeordneten Porenbetonschalen  
 von *Hubert Rüs ch* und *Erhardt Lassas* 9,— DM
- Heft 134: Über das Verhalten von Beton in chemisch angreifenden Wässern (1959)**  
 von *Kurt Seidel* vergriffen
- Heft 135: Versuche über die beim Betonieren an den Schalungen entstehenden Belastungen**  
 von *Otto Gra f f* und *Ferdinand Kaufmann*  
 Druckfestigkeit von Beton in der oberen Zone nach dem Verdichten durch Innen-  
 rüttler  
 von *Kurt Walz* und *Hermann Sch äffler*  
 Versuche über die Verdichtung von Beton auf einem Rütteltisch in lose aufge-  
 setzter und in aufgespannter Form (1960)  
 von *Johannes Strey* vergriffen
- Heft 136: Gas- und Schaumbeton: (1960)**  
 Versuche über die Verankerung der Bewehrung in Gasbeton  
 von *Hermann Sch äffler*  
 Über das Kriechen von bewehrten Platten aus dampfgehärtetem Gas- und Schaum-  
 beton  
 von *Hermann Sch äffler* 21,— DM
- Heft 137: Schubversuche an Spannbetonbalken ohne Schubbewehrung**  
 von *Hubert Rüs ch* und *Gunnar Vigerust*  
 Die Schubfestigkeit von Spannbetonbalken ohne Schubbewehrung (1960)  
 von *Gunnar Vigerust* vergriffen



<b>Heft 138:</b>	<b>Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton</b> (1961) von <i>Gallus Rehm</i>	vergriffen
<b>Heft 139:</b>	<b>Theoretische Auswertung von Heft 120 — Festigkeit der Biegedruckzone</b> (1961) von <i>Günter Scholz</i>	10,70 DM
<b>Heft 140:</b>	<b>Versuche mit Betonformstählen</b> (1963) von <i>Hubert Rüschi und Gallus Rehm</i>	29,80 DM
<b>Heft 141:</b>	<b>Das spiegeloptische Verfahren</b> (1962) von <i>Hans Weidemann und Werner Koepcke</i>	18,40 DM
<b>Heft 142:</b>	<b>Einpreßmörtel für Spannbeton</b> (1960) von <i>Walter Albrecht und Hermann Schmidt</i>	13,50 DM
<b>Heft 143:</b>	<b>Gas- und Schaumbeton:</b> (1961) <b>Rostschutz der Bewehrung</b> von <i>Walter Albrecht und Hermann Schäffler</i> <b>Festigkeit der Biegedruckzone</b> von <i>Hubert Rüschi und Rudolf Sell</i>	28,— DM
<b>Heft 144:</b>	<b>Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung</b> von <i>Kurt Gaede</i> <b>Über den Einfluß der Größe der Proben auf die Würfeldruckfestigkeit von Beton</b> (1962) von <i>Kurt Gaede</i>	27,— DM
<b>Heft 145:</b>	<b>Schubversuche an Stahlbeton-Rechteckbalken mit gleichmäßig verteilter Belastung</b> von <i>Hubert Rüschi, Finn Robert Haugli und Horst Mayer</i> <b>Stahlbetonbalken bei gleichzeitiger Einwirkung von Querkraft und Moment</b> (1962) von <i>Finn Robert Haugli</i>	29,— DM
<b>Heft 146:</b>	<b>Der Einfluß der Zementart, des Wasser-Zement-Verhältnisses und des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton</b> von <i>Alfred Hummel, Karlhans Wesche und Walter Brand</i> <b>Der Einfluß des mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton</b> (1962) von <i>Hubert Rüschi, Karl Kordina und Hubert Hilsdorf</i>	58,— DM
<b>Heft 147:</b>	<b>Versuche zur Bestimmung der Übertragungslänge von Spannstählen</b> von <i>Hubert Rüschi und Gallus Rehm</i> <b>Ermittlung der Eigenspannungen und der Eintragungslänge bei Spannbetonfertigteilen</b> (1963) von <i>Kurt Gaede</i>	22,60 DM
<b>Heft 148:</b>	<b>Der Einfluß von Bügeln und Druckstäben auf das Verhalten der Biegedruckzone von Stahlbetonbalken</b> (1963) von <i>Hubert Rüschi und Siegfried Stöckl</i>	27,60 DM
<b>Heft 149:</b>	<b>Über den Zusammenhang zwischen Qualität und Sicherheit im Betonbau</b> (1962) von <i>Hans Blaut</i>	18,50 DM
<b>Heft 150:</b>	<b>Das Verhalten von Betongelenken bei oftmals wiederholter Druck- und Biegebeanspruchung</b> (1962) von <i>Johannes Dix</i>	vergriffen
<b>Heft 151:</b>	<b>Versuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung</b> (1962) von <i>Fritz Leonhardt und René Walther</i>	20,— DM
<b>Heft 152:</b>	<b>Versuche an Plattenbalken mit hoher Schubbeanspruchung</b> (1962) von <i>Fritz Leonhardt und René Walther</i>	27,50 DM
<b>Heft 153:</b>	<b>Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung</b> (1962) von <i>Alfred Mehmel und Edgar Kern</i>	25,— DM
<b>Heft 154:</b>	<b>Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit</b> (1962) von <i>Christfried Rasch</i>	26,30 DM
<b>Heft 155:</b>	<b>Einfluß des Zementleimgehaltes und der Versuchsmethode auf die Kenngrößen der Biegedruckzone von Stahlbetonbalken</b> von <i>Hubert Rüschi und Siegfried Stöckl</i> <b>Einfluß der Zwischenlagen auf Streuung und Größe der Spaltzugfestigkeit von Beton</b> (1963) von <i>Rudolf Sell</i>	19,80 DM
<b>Heft 156:</b>	<b>Schubversuche an Plattenbalken mit unterschiedlicher Schubbewehrung</b> von <i>Fritz Leonhardt und René Walther</i> (1963)	29,60 DM
<b>Heft 157:</b>	<b>Untersuchungen über das Bruch- und Verformungsverhalten von Beton bei zweiachsiger Beanspruchung</b> (1963) von <i>Helmuth Weigler und Gerhard Becker</i>	20,70 DM
<b>Heft 158:</b>	<b>Rückprallprüfung von Beton mit dichtem Gefüge</b> von <i>Kurt Gaede und Ernst Schmidt</i> <b>Konsistenzmessung von Beton</b> (1964) von <i>Walter Albrecht und Hermann Schäffler</i>	20,60 DM
<b>Heft 159:</b>	<b>Die Beanspruchung des Verbundes zwischen Spannglied und Beton</b> (1964) von <i>Herbert Kupfer</i>	12,30 DM

- Heft 160: **Versuche mit Betonformstählen (Teil II)** (1963)  
von *Hubert Rüsck* und *Gallus Rehm* 21,80 DM
- Heft 161: **Modellstatische Untersuchung punktförmig gestützter schiefwinkliger Platten unter besonderer Berücksichtigung der elastischen Auflagen- nachgiebigkeit** (1964)  
von *Alfred Mehmel* und *Hans Weise* vergriffen
- Heft 162: **Verhalten von Stahlbeton und Spannbeton beim Brand** (1964)  
von *Horst Seekamp*, *Wolfram Becker*, *Werner Struck*, *Karl Kordina* und *Hans-Joachim Wierig* 27,— DM
- Heft 163: **Schubversuche an Durchlaufträgern** (1964)  
von *Fritz Leonhardt* und *René Walther* 38,60 DM
- Heft 164: **Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen** (1964)  
von *Helmut Weigler*, *Rudolf Fischer* und *Heinz Dettling* 24,60 DM
- Heft 165: **Versuche mit Betonformstählen (Teil III)** 1964  
von *Hubert Rüsck* und *Gallus Rehm* 22,60 DM
- Heft 166: **Berechnungstabellen für schiefwinkliger Fahrbahnplatten von Straßenbrücken**  
von *Hubert Rüsck*, *Arnfried Hergenröder* und *Ihsan Mungan* (1967) (in Leinen) 38,— DM
- Heft 167: **Frostwiderstand und Porengefüge des Betons, Beziehungen und Prüfverfahren**  
von *Axel Schäfer*  
**Der Einfluß von mehlfeinen Zuschlagstoffen auf die Eigenschaften von Einpreß- mörtern für Spannkäule, Einpreßversuche an langen Spannkäulen** (1965)  
von *Walter Albrecht* 27,60 DM
- Heft 168: **Versuche mit Ausfallkörnungen**  
von *Walter Albrecht* und *Hermann Schöffler*  
**Der Einfluß der Zementsteinporen auf die Widerstandsfähigkeit von Beton im Seewasser**  
von *Karlhans Wesche*  
**Das Verhalten von jungem Beton gegen Frost**  
von *Friedrich Henkel*  
**Zur Frage der Verwendung von Bolzensetzgeräten zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Beton** (1965)  
von *Kurt Gaede* 24,50 DM
- Heft 169: **Versuche zum Studium des Einflusses der Rißbreite auf die Rostbildung an der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen**  
von *Gallus Rehm* und *Hans Moll*  
**Über die Korrosion von Stahl im Beton** (1965)  
von *Hans Leonhardt Moll* 25,60 DM
- Heft 170: **Beobachtungen an alten Stahlbetonbauteilen hinsichtlich Carbonatisierung des Betons und Rostbildung an der Bewehrung**  
von *Gallus Rehm* und *Hans Leonhardt Moll*  
**Untersuchung über das Fortschreiten der Carbonatisierung an Betonbauwerken durchgeführt im Auftrage der Abteilung Wasserstraßen des Bundesverkehrs- ministeriums, zusammengestellt von Hans-Joachim Kleinschmidt**  
**Tiefe der carbonatisierten Schicht alter Betonbauten, Untersuchungen an Betonproben**  
durchgeführt vom Forschungsinstitut für Hochofenschlacke, Rheinhausen und vom Laboratorium der westfälischen Zementindustrie, Beckum, zu- sammengestellt im Forschungsinstitut der Zementindustrie des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf (1965) 29,20 DM
- Heft 171: **Knickversuche mit Zweigelenkrahmen aus Stahlbeton** (1965)  
von *Walther Bochmann* und *Siegfried Röbert* 19,10 DM
- Heft 172: **Untersuchungen über den Stoßverlauf beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Stützen und Rahmenstiele aus Stahlbeton** (1965)  
von *Camillo Popp* 20,— DM
- Heft 173: **Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons** (1965)  
Zusammenfassung und Kritik früherer Versuche  
und Vorschlag für eine neue Prüfmethode von *Hubert Hilsdorf* 15,60 DM
- Heft 174: **Untersuchungen über die Tragfähigkeit netzbewehrter Betonsäulen** (1965)  
von *Helmut Weigler* und *J. Henzel* 15,60 DM
- Heft 175: **Betongelenke**  
Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung  
von *Fritz Leonhardt* und *Horst Reimann*  
**Kritische Spannungszustände des Betons bei mehrachsiger ruhender Kurzzeitbelastung** (1965)  
von *Horst Reimann* vergriffen
- Heft 176: **Zur Frage der Dauerfestigkeit von Spannbetonbauteilen** (1966)  
von *Martin Mayer* 17,80 DM
- Heft 177: **Umlagerung der Schnittkräfte in Stahlbetonkonstruktionen Grundlagen der Berechnung bei statisch unbestimmten Tragwerken unter Berücksichtigung der plastischen Verformungen** (1966)  
von *P. S. Rao* 22,30 DM
- Heft 178: **Wandartige Träger** (1966)  
von *Fritz Leonhardt* und *René Walther* vergriffen

- Heft 179:** Veränderlichkeit der Biege- und Schubsteifigkeit bei Stahlbetontragwerken und ihr Einfluß auf Schnittkraftverteilung und Traglast bei statisch unbestimmter Lagerung (1966)  
von *Walter Dilger* 24,50 DM
- Heft 180:** Knicken von Stahlbetonstäben mit Rechteckquerschnitt unter Kurzzeitbelastung (1966)  
Berechnung mit Hilfe von automatischen Digitalrechenanlagen  
von *Albrecht Blaser* 15,60 DM
- Heft 181:** Brandverhalten von Stahlbetonplatten — Einflüsse von Schutzschichten —  
von *Karl Kordina* und *Paul Bornemann*  
Grundlagen für die Bemessung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonplatten (1966)  
von *Paul Bornemann* 20,— DM
- Heft 182:** Karbonatisierung von Schwerbeton  
von *Adolf Meyer*, *Hans-Joachim Wierig* und *Klaus Husmann*  
Einfluß von Luftkohlenensäure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen (1967)  
von *Fritz Schröder*, *Heinz-Günter Smolczyk*, *Karl Grade*, *Reinhard Vinkeloe* und *Rudolf Roth* 24,— DM
- Heft 183:** Das Kriechen des Zementsteins im Beton und seine Beeinflussung durch gleichzeitiges Schwinden (1966)  
von *Walter Ruetz* 15,60 DM
- Heft 184:** Untersuchungen über den Einfluß einer Nachverdichtung und eines Anstriches auf Festigkeit, Kriechen und Schwinden von Beton (1966)  
von *Hubert Hilsdorf* und *Klemens Finsterwalder* 15,60 DM
- Heft 185:** Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Rand- und Kernzonen von Beton (1966)  
von *Siegfried Stöckl* 17,80 DM
- Heft 186:** Betone aus Sulfathüttenzement in höherem Alter (1966)  
von *Karlhans Wesche* und *Wilhelm Manns* 15,60 DM
- Heft 187:** Zur Frage des Einflusses der Ausbildung der Auflager auf die Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbalken  
von *Kurt Gaede*  
Schwingungsmessungen an Massivbrücken (1966)  
von *Bruno Brückmann* 17,80 DM
- Heft 188:** Verformungsversuche an Stahlbetonbalken mit hochfestem Bewehrungsstahl (1967)  
von *Gotthard Franz* und *Heinrich Brenker* 22,30 DM
- Heft 189:** Die Tragfähigkeit von Decken aus Glasstahlbeton (1967)  
von *Cölestin Zelger* 20,— DM
- Heft 190:** Festigkeit der Biegedruckzone — Vergleich von Prismen- und Balkenversuchen (1967)  
von *Hubert Rüschi*, *Karl Kordina* und *Siegfried Stöckl* 15,60 DM
- Heft 191:** Experimentelle Bestimmung der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone  
von *Christfried Rasch*  
Stützmomente kreuzweise bewehrter durchlaufender Rechteckbetonplatten (1967)  
von *Heinz Schwarz* 17,80 DM
- Heft 192:** Die mitwirkende Breite der Gurte von Plattenbalken (1967)  
von *Werner Koepcke* und *Günter Denecke* 27,80 DM
- Heft 193:** Bauschäden als Folge der Durchbiegung von Stahlbeton-Bauteilen (1967)  
von *Horst Mayer* und *Hubert Rüschi* 24,50 DM
- Heft 194:** Die Berechnung der Durchbiegung von Stahlbeton-Bauteilen (1967)  
von *Horst Mayer* 24,50 DM
- Heft 195:** 5 Versuche zum Studium der Verformungen im Querkraftbereich eines Stahlbetonbalkens (1967)  
von *Hubert Rüschi* und *Horst Mayer* 22,20 DM
- Heft 196:** Tastversuche über den Einfluß von vorangegangenen Dauerlasten auf die Kurzzeitfestigkeit des Betons (1967)  
von *Siegfried Stöckl*  
Kennzahlen für das Verhalten einer rechteckigen Biegedruckzone von Stahlbetonbalken unter kurzzeitiger Belastung  
von *Hubert Rüschi* und *Siegfried Stöckl* 25,30 DM
- Heft 197:** Brandverhalten durchlaufender Stahlbetonrippendecken  
von *Horst Seekamp* und *Wolfram Becker*  
Brandverhalten kreuzweise bewehrter Stahlbetonrippendecken  
von *Jürgen Stanke*  
Vergrößerung der Betondeckung als Feuerschutz von Stahlbetonplatten 1. und 2. Teil (1967)  
von *Horst Seekamp* und *Wolfram Becker* 26,25 DM
- Heft 198:** Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast (1968)  
von *H. Rüschi*, *R. Sell*, *Ch. Rasch*, *E. Grasser*, *A. Hummel*, *K. Wesche* und *H. Flatten* 24,90 DM

Heft 199:	Die Berechnung ebener Kontinua mittels der Stabwerkmethode — Anwendung auf Balken mit einer rechteckigen Öffnung (1968) von <i>Albert Krebs</i> und <i>Friedrich Haas</i>	20,— DM
Heft 200:	Dauerschwingfestigkeit von Betonstählen im einbetonierten Zustand (1968) von <i>Helmut Wascheidt</i> Betongelenke unter wiederholten Gelenkverdrehungen von <i>Gotthard Franz</i> und <i>Hans-Dieter Fein</i>	21,80 DM
Heft 201:	Schubversuche an indirekt gelagerten, einfeldrigen und durchlaufenden Stahlbetonbalken (1968) von <i>Fritz Leonhardt</i> , <i>René Walther</i> und <i>Walter Dilger</i>	17,80 DM
Heft 202:	Torsions- und Schubversuche an vorgespannten Hohlkastenträgern von <i>Fritz Leonhardt</i> , <i>René Walther</i> und <i>Otto Vogler</i> Torsionsversuche an einem Kunstharzmodell eines Hohlkastenträgers (1968) von <i>Diethelm Feder</i>	22,20 DM
Heft 203:	Festigkeit und Verformung von Beton unter Zugspannungen (1969) von <i>Hans Georg Heilmann</i> , <i>Hubert Hülsdorf</i> und <i>Klemens Finsterwalder</i>	26,70 DM
Heft 204:	Tragverhalten ausmittig beanspruchter Stahlbetondruckglieder (1969) von <i>Alfred Mehmelt</i> , <i>Heinz Schwarz</i> , <i>Karl-Heinz Kasperek</i> und <i>Joszeif Makovi</i>	22,30 DM
Heft 205:	Versuche an wandelbewehrten Stahlbetonsäulen unter kurz- und langfristig wirkenden zentrischen Lasten (1969) von <i>Hubert Rüsch</i> und <i>Siegfried Stöckl</i>	22,20 DM
Heft 206:	Statistische Analyse der Betonfestigkeit (1969) von <i>Hubert Rüsch</i> , <i>Rudolf Sell</i> und <i>Rüdiger Rackwitz</i>	15,60 DM
Heft 207:	Versuche zur Dauerfestigkeit von Leichtbeton von <i>Rudolf Sell</i> und <i>Cölestin Zelger</i> Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone Einflüsse der Querschnittsform (1969) von <i>Siegfried Stöckl</i> und <i>Hubert Rüsch</i>	24,50 DM
Heft 208:	Zur Frage der Rißbildung durch Eigen- und Zwängspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen (1969) von <i>Horst Falkner</i>	vergriffen
Heft 209:	Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiaxialer Druck-Zug-Beanspruchung von <i>Rudolf Sell</i> Versuche über den Verbund bei bewehrtem Gasbeton (1970) von <i>Rudolf Sell</i> und <i>Cölestin Zelger</i>	22,30 DM
Heft 210:	Schubversuche mit indirekter Krafteinleitung Versuche zum Studium der Verdübelungswirkung der Biegezugbewehrung eines Stahlbetonbalkens (1970) von <i>Theodor Baumann</i> und <i>Hubert Rüsch</i>	26,70 DM
Heft 211:	Elektronische Berechnung des in einem Stahlbetonbalken im gerissenen Zustand auftretenden Kräftezustandes unter besonderer Berücksichtigung des Querkraftbereiches (1970) von <i>Dieter Jungwirth</i>	29,30 DM
Heft 212:	Einfluß der Krümmung von Spanngliedern auf den Spannweg von <i>Cölestin Zelger</i> und <i>Hubert Rüsch</i> Über den Erhaltungszustand 20 Jahre alter Spannbetonträger (1970) von <i>Karl Kordina</i> und <i>Nils Valerian Waubke</i>	17,80 DM
Heft 213:	Vierseitig gelagerte Stahlbetonhohlplatten — Versuche, Berechnung und Bemessung (1970) von <i>Helmut Aster</i>	22,— DM
Heft 214:	Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonstützen durch Anwendung von Bekleidungen oder Ummantelungen von <i>Wolfram Becker</i> und <i>Jürgen Stanke</i> Über das Verhalten von Zementmörtel und Beton bei höheren Temperaturen (1970) von <i>Rudolf Fischer</i>	28,50 DM
Heft 215:	Brandversuche an Stahlbetonfertigungstützen, 2. und 3. Teil (1970) von <i>Wolfram Becker</i> und <i>Jürgen Stanke</i>	28,50 DM
Heft 216:	Schnittkrafttafeln für den Entwurf kreiszylindrischer Tonnenkettendächer (1971) von <i>Alfred Mehmelt</i> , <i>Wolfgang Kruse</i> , <i>Sabri Samaan</i> und <i>Heinz Schwarz</i>	39,00 DM
Heft 217:	Tragwirkung orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächen-tragwerken aus Stahlbeton (1972) von <i>Th. Baumann</i>	18,30 DM
Heft 218:	Versuche zur Schubsisicherung und Momentendeckung von profilierten Stahlbetonbalken (1972) von <i>H. Kupfer</i> und <i>Th. Baumann</i>	20,50 DM
Heft 219:	Die Tragfähigkeit von Stahlsteindecken von <i>C. Zelger</i> und <i>F. Daschner</i> Bewehrte Ziegelstütze (1972) von <i>C. Zelger</i>	18,90 DM

Heft 220:	Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045, Ausgabe Dezember 1978 – Biegung mit Längskraft, Schub, Torsion von <i>E. Grasser</i> – Nachweis der Knicksicherheit von <i>K. Kordina</i> und <i>U. Quast</i> 2. überarbeitete Auflage (1979)	50,00 DM
Heft 221:	Festigkeit und Verformung von Innenwandknoten in der Tafelbauweise von <i>H. Kupfer</i> Die Druckfestigkeit von Mörtelfugen zwischen Betonfertigteilen von <i>E. Grasser</i> und <i>F. Daschner</i> Tragfähigkeit (Schubfestigkeit) von Deckenaufgaben im Fertigteilbau (1972) von <i>R. v. Halasz</i> und <i>G. Tantom</i>	26,60 DM
Heft 222:	Druck-Stöße von Bewehrungsstäben Stahlbetonstützen mit hochfestem Stahl St 90 (1972) von <i>Fritz Leonhardt</i> und <i>K.-Th. Teichen</i>	18,00 DM
Heft 223:	Spanngliedverankerungen im Inneren von Bauteilen von <i>J. Eibl</i> und <i>G. Ivanyi</i> Teilweise Vorspannung (1973) von <i>R. Walther</i> und <i>N. S. Bhal</i>	22,90 DM
Heft 224:	Zusammenwirken von einzelnen Fertigteilen als großflächige Schelbe (1973) von <i>G. Mehlhorn</i>	30,20 DM
Heft 225:	Mikrobeton für modellstatistische Untersuchungen (1972) von <i>A.-Hilmar Burggrabe</i>	24,70 DM
Heft 226:	Tragfähigkeit von Zugschlaufenstößen von <i>F. Leonhardt</i> , <i>R. Walther</i> und <i>H. Dieterle</i> Haken- und Schlaufenverbindungen in biegebeanspruchten Platten von <i>G. Franz</i> und <i>G. Timm</i> Übergreifungsvollstöße mit hakenförmig gebogenen Rippenstählen (1973) von <i>K. Kordina</i> und <i>G. Fuchs</i>	26,20 DM
Heft 227:	Schubversuche an Spannbetonträgern von <i>Fritz Leonhardt</i> , <i>Rainer Koch</i> und <i>Ferdinand-S. Rostásy</i> (1973)	49,80 DM
Heft 228:	Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung (1973) von <i>Horst Martin</i>	23,40 DM
Heft 229:	Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung von <i>Helmut Kupfer</i> Bau und Erprobung einer Versuchseinrichtung für zweiachsige Belastung von <i>Helmut Kupfer</i> und <i>Cölestin Zelger</i> (1973)	36,00 DM
Heft 230:	Erwärmungsvorgänge in balkenartigen Stahlbetonteilen unter Brandbeanspruchung von <i>H. Ehm</i> , <i>K. Kordina</i> und <i>R. v. Postel</i> (1975)	37,80 DM
Heft 231:	Die Versuchsberichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Inhaltsübersicht der Hefte 1 bis 230 von <i>Otto Graf</i> und <i>Herbert Deutschmann</i> (1973)	18,80 DM
Heft 232:	Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins von <i>F. Wittmann</i> Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und unter Dauerlast von <i>F. Wittmann</i> und <i>J. Zaitsev</i> . (1974)	26,60 DM
Heft 233:	Stichprobenprüfpläne und Annahmekennlinien für Beton von <i>Hans Blaut</i> (1973)	14,70 DM
Heft 234:	Finite Elemente zur Berechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern von <i>J. H. Argyris</i> , <i>G. Faust</i> , <i>J. R. Roy</i> , <i>J. Szimmat</i> , <i>E. P. Warnke</i> und <i>K. J. William</i> (1973)	24,50 DM
Heft 235:	Untersuchungen zum heißen Liner als Innenwand für Spannbetondruckbehälter für Leichtwasserreaktoren von <i>Joachim Meyer</i> und <i>Walter Spandick</i> (1973)	26,75 DM
Heft 236:	Tragfähigkeit und Sicherheit von Stahlbetonstützen unter ein- und zweiachsiger exzentrischer Kurzzeit- und Dauerbelastung von <i>Robert F. Warner</i> (1974)	15,50 DM
Heft 237:	Spannbeton-Reaktordruckbehälter: Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im Reaktordruckbehälterbau von <i>J. Eibl</i> , <i>N. V. Waubke</i> , <i>W. Klingsch</i> , <i>U. Schneider</i> , <i>G. Rieche</i> Parameterberechnungen an einem Referenzbehälter von <i>J. Szimmat</i> und <i>K. Willam</i> Einfluß von Werkstoffeigenschaften auf Spannungs- und Verformungszustände eines Spannbetonbehälters von <i>V. Hansson</i> und <i>F. Stangenberg</i> (1974)	24,50 DM
Heft 238:	Einfluß wirklichkeitsnahen Werkstoffverhaltens auf die kritischen Kipplasten schlanker Stahlbeton- und Spannbetonträger von <i>G. Mehlhorn</i> Berechnung von Stahlbetonscheiben im Zustand II bei Annahme eines wirklichkeitsnahen Werkstoffverhaltens von <i>K. Dörr</i> , <i>G. Mehlhorn</i> , <i>W. Stauder</i> und <i>D. Uhlisch</i> (1974)	31,10 DM

Heft 239:	<b>Torsionsversuche an Stahlbetonbalken</b> von Fritz Leonhardt und Günther Schelling (1974)	37,80 DM
Heft 240:	<b>Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045, Ausgabe Januar 1972</b> von E. Grasser und G. Thielen (1976)	28.— DM
Heft 241:	<b>Abplatzversuche an Prüfkörpern aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton bei verschiedenen Temperaturbeanspruchungen</b> von C. Meyer-Ottens (1974)	17,90 DM
Heft 242:	<b>Verhalten von verzinkten Spannstählen und Bewehrungsstählen</b> von G. Rehm, A. Lämmke, U. Nürnberger, G. Rieche sowie H. Martin und A. Rauen <b>Löten von Betonstahl</b> von D. Rußwurm (1974)	37,80 DM
Heft 243:	<b>Ultraschall-Impulstechnik bei Fertigteilen</b> von G. Rehm, N. V. Waubke und J. Neisecke <b>Untersuchungen an ausgebauten Spanngliedern</b> von A. Röhmisch (1975)	28,90 DM
Heft 244:	<b>Elektronische Berechnung der Auswirkungen von Kriechen und Schwinden bei abschnittsweise hergestellten Verbundstabwerken</b> von D. Schade und W. Haas (1975)	13,30 DM
Heft 245:	<b>Die Kornfestigkeit künstlicher Zuschlagstoffe und ihr Einfluß auf die Betonfestigkeit</b> von R. Sell <b>Druckfestigkeit von Leichtbeton</b> von K. D. Schmidt-Hurtienne (1974)	32,50 DM
Heft 246:	<b>Untersuchungen über den Querstoß beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Gründungspfähle aus Stahlbeton und Stahl</b> von C. Popp (1974)	32,00 DM
Heft 247:	<b>Temperatur und Zwangsspannung im Konstruktions-Leichtbeton infolge Hydratation</b> von H. Weigler und J. Nicolay <b>Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton</b> von H. Weigler und W. Freitag (1975)	25,40 DM
Heft 248:	<b>Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen</b> von C. Meyer-Ottens (1975)	15,60 DM
Heft 249:	<b>Schlag-Biegeversuche mit unterschiedlich bewehrten Stahlbetonbalken</b> von C. Popp (1975)	18,50 DM
Heft 250:	<b>Langzeitversuche an Stahlbetonstützen</b> von K. Kordina <b>Einfluß des Kriechens auf die Ausbiegung schlanker Stahlbetonstützen</b> von K. Kordina und R. F. Warner (1975)	20,70 DM
Heft 251:	<b>Versuche an wendelbewehrten Stahlbetonsäulen unter exzentrischer Belastung</b> von S. Stöckl und B. Menne (1975)	20,— DM
Heft 252:	<b>Beständigkeit verschiedener Betonarten im Meerwasser und in sulfathaltigem Wasser</b> von H. Th. Schröder, O. Hallauer und W. Scholz (1975)	28,90 DM
Heft 253:	<b>Spannbeton-Reaktordruckbehälter</b> <b>Instrumentierung</b> von J. Nemet und R. Angeli <b>Versuch zur Weiterentwicklung eines Setzdehnungsmessers</b> von C. Zelger (1975)	19,— DM
Heft 254:	<b>Festigkeit und Verformungsverhalten von Beton unter hohen zweiachsigen Dauerbelastungen und Dauerschwellbelastungen und</b> <b>Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsiger Kurzzeitbeanspruchung</b> Von D. Linse und A. Stegbauer (1976)	24,50 DM
Heft 255:	<b>Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonisierungstiefe des Betons</b> von P. Schießl (1976)	22,20 DM
Heft 256:	<b>Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles</b> von J. Hundt (1975)	29,40 DM
Heft 257:	<b>Bruchsicherheitsberechnung von Spannbeton-Druckbehältern</b> von K. Schimmelpfennig (1976)	24,80 DM
Heft 258:	<b>Hygrische Transportphänomene in Baustoffen</b> von K. Gertis, K. Kießl, H. Werner und V. Wolfseher (1976)	24,50 DM
Heft 259:	<b>Entwicklung eines integrierten Spannbetondruckbehälters für wassergekühlte Reaktoren (SBB Typ „Stern“ mit Stützkessel)</b> von G. Jüptner, H. Kumpf, G. Molz, B. Neunert und O. Seidl (1976)	21,40 DM
Heft 260:	<b>Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton</b> von J. Eibl und G. Iványi (1976)	49,80 DM
Heft 261:	<b>Der Einfluß radioaktiver Strahlung auf die mechanischen Eigenschaften von Beton</b> von H. Hilsdorf, J. Kropp und H.-J. Koch (1976)	15,60 DM

Heft 262:	Experimentelle Bestimmung des räumlichen Spannungszustandes eines Reaktordruckbehältermodells von R. Stöver (1976)	24,50 DM
Heft 263:	Bruchfestigkeit und Bruchverformung von Beton unter mehraxialer Belastung bei Raumtemperatur von F. Bremer und F. Steinsdörfer (1976)	14,00 DM
Heft 264:	Spannbeton-Reaktordruckbehälter mit heißer Dichthaut für Druckwasserreaktoren von A. Jungmann, H. Kopp, M. Gangl, J. Némethy, A. Nesitka, W. Walluschek-Wallfeld und J. Mutzl (1976)	20,00 DM
Heft 265:	Traglast von Stahlbetondruckgliedern unter schiefer Biegung von K. Kordina, K. Raflaß und O. Hjorth (1976)	22,00 DM
Heft 266:	Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenfeilern mit Rollenlagern von K. Liermann (1976)	24,00 DM
Heft 267:	Zur Mindestbewehrung für Zwang von Außenwänden aus Stahlleichtbeton von Ferdinand S. Rostásy, R. Koch und F. Leonhardt Versuche zum Tragverhalten von Druckübergreifungsstößen in Stahlbetonwänden von F. Leonhardt, Ferdinand S. Rostásy und M. Patzak (1976)	28,00 DM
Heft 268:	Einfluß der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen) von L. Franke (1976)	16,00 DM
Heft 269:	Zugspannung und Dehnung in unbewehrten Betonquerschnitten bei exzentrischer Belastung von H. G. Heilmann (1976)	29,00 DM
Heft 270:	Eine Formulierung des zweiaxialen Verformungs- und Bruchverhaltens von Beton und deren Anwendung auf die wirklichkeitsnahe Berechnung von Stahlbetonplatten von J. Link (1976)	26,70 DM
Heft 271:	Untersuchungen an 20 Jahre alten Spannbetonträgern von R. Bühner, K.-F. Müller, H. Martin und J. Ruhnau (1976)	24,40 DM
Heft 272:	Die Dynamische Relaxation und ihre Anwendung auf Spannbeton-Reaktordruckbehälter von W. Zerna (1976)	25,50 DM
Heft 273:	Schubversuche an Balken mit veränderlicher Trägerhöhe von Ferdinand S. Rostásy, K. Roeder und F. Leonhardt (1977)	18,00 DM
Heft 274:	Witterungsbeständigkeit von Beton, 2. Bericht von K. Walz und E. Hartmann (1977)	15,60 DM
Heft 275:	Schubversuche an Balken und Platten bei gleichzeitigem Längszug von F. Leonhardt, F. Rostásy, J. MacGregor und M. Patzak (1977)	20,50 DM
Heft 276:	Versuche an zugbeanspruchten Übergreifungsstößen von Rippenstählen von S. Stöckl, B. Menne und H. Kupfer (1977)	28,90 DM
Heft 277:	Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses von G. Schickert und H. Winkler (1977)	32,00 DM
Heft 278:	Berechnungen von Temperatur- und Feuchtefeldern in Massivbauten nach der Methode der Finiten Elemente von J. H. Argyris, E. P. Warnke und K. J. Willam (1977)	18,70 DM
Heft 279:	Finite Elementberechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern von J. H. Argyris, G. Faust, J. Szimmat, E. P. Warnke und K. J. Willam Zur Konvertierung von SMART I von J. H. Argyris, J. Szimmat und K. J. Willam (1977)	21,40 DM
Heft 280:	Nichtisothermer Feuchtetransport in dickwandigen Betonteilen von Reaktordruckbehältern – Zur Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton – Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons – von K. Gertis, J. Hundt und M. J. Setzer	26,70 DM
Heft 281:	Untersuchungen über das Verhalten von Beton bei schlagartiger Beanspruchung von C. Popp (1977)	14,70 DM
Heft 282:	Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dehnungsbehinderung von R. Walter, G. Utescher und D. Schreck (1977)	16,70 DM
Heft 283:	Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton von G. Rehm, P. Diem und R. Zimbelmann (1977)	24,50 DM
Heft 284:	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Lasteintragung in die Bewehrung von Stahlbetondruckgliedern von F. P. Müller und W. Eisenbiegler (1977)	15,20 DM
Heft 285:	Zur Traglast der ausmittig gedrückten Stahlbetonstütze mit Umschnürringbewehrung von B. Menne (1977)	16,00 DM
Heft 286:	Versuche über Teilflächenbelastung von Normalbeton von P. Wurm und F. Daschner (1977)	20,00 DM
Heft 287:	Spannbetonbehälter für Siedewasserreaktoren mit einer Leistung von 1600 MW von F. Bremer und W. Spandick (1977)	12,70 DM
Heft 288:	Tragverhalten von aus Fertigteilen zusammengesetzten Scheiben von G. Mehlhorn und H. Schwing Versuche zur Schubtragfähigkeit verzahnter Fugen von G. Mehlhorn, H. Schwing und K.-R. Berg (1977)	26,70 DM

<b>Heft 289:</b>	<b>Prüfverfahren zur Beurteilung von Rostschutzmitteln für die Bewehrung von Gasbeton</b> Von <i>W. Manns, H. Schneider, R. Schönfelder</i> <b>Frostwiderstand von Beton</b> von <i>W. Manns, E. Hartmann</i> <b>Zum Einfluß von Mineralölen auf die Festigkeit von Beton</b> von <i>W. Manns, E. Hartmann</i> (1977)	16,00 DM
<b>Heft 290:</b>	<b>Studie über den Abbruch von Spannbeton-Reaktordruckbehältern</b> von <i>K. Kleiser, K. Essig, K. Cerff und H. K. Hilsdorf</i> <b>Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons</b> von <i>F. H. Wittmann</i> (1977)	26,70 DM
<b>Heft 291:</b>	<b>Übergreifungsstöße von Rippenstäben unter schwellender Belastung</b> von <i>G. Rehm und R. Eligehausen</i> <b>Übergreifungsstöße geschweißter Betonstahlmatten</b> von <i>G. Rehm, R. Tewes und R. Eligehausen</i> (1977)	20,00 DM
<b>Heft 292:</b>	<b>Lösung versuchstechnischer Fragen bei der Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton unter dreiachsiger Belastung</b> von <i>D. Linse</i> (1978)	15,60 DM
<b>Heft 293:</b>	<b>Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern</b> von <i>N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andrae und W. Markowski</i> (1978)	21,40 DM
<b>Heft 294:</b>	<b>Studien zur Auslegung von Spannbetondruckbehältern für wasser-gekühlte Reaktoren</b> von <i>K. Schimmelpfennig, G. Bätjer, U. Eckstein, U. Ick und S. Wrage</i> (1978)	20,00 DM
<b>Heft 295:</b>	<b>Kriech- und Relaxationsversuche an sehr altem Beton</b> von <i>H. Trost, H. Cordes und G. Abele</i> <b>Kriechen und Rückkriechen von Beton nach langer Lasteinwirkung</b> von <i>P. Probst und S. Stöckl</i> <b>Versuche zum Einfluß des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton</b> von <i>K. Wesche, I. Schrage und W. vom Berg</i> (1978)	26,70 DM
<b>Heft 296:</b>	<b>Die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangsbeanspruchung infolge Temperatur</b> von <i>P. Noakowski</i> (1978)	
<b>Heft 297:</b>	<b>Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes und des Reifegrades auf die Wärmeleitfähigkeit von Beton</b> von <i>Jürgen Hundt, Armin Wagner</i> <b>Sorptionsuntersuchungen am Zementstein, Zementmörtel und Beton</b> von <i>Jürgen Hundt, Hans Kantelbach</i> (1978)	16,00 DM
<b>Heft 298:</b>	<b>Erfahrungen bei der Prüfung von Temporären Korrosionsschutzmitteln für Spannstähle</b> von <i>Günter Rieche, Josef Delille</i> <b>Untersuchungen über den Korrosionsschutz von Spannstählen unter Spritzbeton</b> von <i>Gallus Rehm, Ulf Nürnberger, Ruprecht Zimbelmann</i>	15,00 DM
<b>Heft 299:</b>	<b>Versuche an dickwandigen, unbewehrten Betonringen mit Innendruckbeanspruchung</b> von <i>Josef Neuner, Siegfried Stöckl, Emil Grasser</i> (1978)	16,00 DM
<b>Heft 300:</b>	<b>Hinweise zur DIN 1045, Ausgabe Dezember 1978</b> Bearbeitet von <i>D. Bertram und H. Deutschmann</i> <b>Erläuterung der Bewehrungsrichtlinien</b> von <i>G. Rehm, R. Eligehausen, B. Neubert</i>	35,00 DM
<b>Heft 301:</b>	<b>Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden</b> (1979) von <i>Rolf Eligehausen</i>	24,00 DM
<b>Heft 302:</b>	<b>Einfluß von Zusatzmitteln auf den Widerstand von jungem Beton gegen Rißbildung bei scharfem Austrocknen</b> von <i>Wilhelm Manns und Kurt Zeus</i> <b>Spannungsoptische Untersuchungen zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen</b> (1979) von <i>Michael Betzle</i>	16,00 DM
<b>Heft 303:</b>	<b>Querkraftschlüssige Verbindung von Stahlbetondeckenplatten</b> (1979) von <i>Heinrich Paschen und Volker Christian Zillich</i>	20,00 DM
<b>Heft 304:</b>	<b>Kunstharzgebundene Glasfaserstäbe als Bewehrung im Betonbau</b> von <i>Gallus Rehm und Lutz Franke</i> <b>Zur Frage der Krafteinleitung in kunstharzgebundene Glasfaserstäbe</b> (1979) von <i>Gallus Rehm, Lutz Franke und Manfred Patzak</i>	17,50 DM
<b>Heft 305:</b>	<b>Vorherbestimmung und Kontrolle des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton</b> (1979) von <i>Siegfried Ziegeldorf, Klaus Kleiser und Hubert K. Hilsdorf</i>	13,50 DM
<b>Heft 306:</b>	<b>Dreidimensionale Berechnung eines Spannbetonbehälters mit heißer Dichthaut für einen 1500 MWe Druckwasserreaktor</b> (1979) von <i>E. Ettel, H. Hinterleitner, J. Nemet, A. Jungmann und H. Kopp</i>	15,— DM
<b>Heft 307:</b>	<b>Zur Bemessung der Schubbewehrung von Stahlbetonbalken mit möglichst gleichmäßiger Zuverlässigkeit</b> (1979) von <i>W. Moosecker</i>	15,— DM
<b>Heft 308:</b>	<b>Tragfähigkeit auf schrägen Druck von Brückenstegen, die durch Hüllrohre geschwächt sind</b> von <i>R. Koch und F. S. Rostásy</i> <b>Spannungszustand aus Vorspannung im Bereich gekrümmter Spannglieder</b> (1979) von <i>V. Cornelius und G. Mehlhorn</i>	18,75 DM



<b>Heft 309:</b>	<b>Kunstharzmörtel und Kunstharzbetone unter Kurzzeit- und Dauerstandbelastung</b> von <i>G. Rehm, L. Franke</i> und <i>K. Zeus</i> <b>Langzeituntersuchungen an epoxidharzverklebten Zementmörtelprismen</b> (1980) von <i>P. Jagfeld</i>	18,50 DM
<b>Heft 310:</b>	<b>Teilweise Vorspannung — Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rißbildung und Rißbreitenbeschränkung</b> (1980) von <i>H. Trost, H. Cordes, U. Thormaehlen</i> und <i>H. Hagen</i>	37,— DM
<b>Heft 311:</b>	<b>Segmentäre Spannbetonträger im Brückenbau</b> (1980) von <i>K. Guckenberger, F. Daschner</i> und <i>H. Kupfer</i>	22,50 DM
<b>Heft 312:</b>	<b>Schwellenwerte beim Betondruckversuch</b> (1980) von <i>G. Schickert</i>	33,50 DM
<b>Heft 313:</b>	<b>Spannungs-Dehnungs-Linien von Leichtbeton</b> von <i>H. Hermann</i> <b>Versuche zum Kriechen und Schwinden von hochfestem Leichtbeton</b> (1980) von <i>P. Probst</i> und <i>S. Stöckl</i>	27,— DM
<b>Heft 314:</b>	<b>Kurzzeitverhalten von extrem leichten Betonen — Druckfestigkeit und Formänderungen</b> von <i>K. Bastgen</i> und <i>K. Wesche</i> <b>Die Schubtragfähigkeit bewehrter Platten und Balken aus dampfgehärtetem Gasbeton nach Versuchen</b> (1980) von <i>D. Briesemann</i>	41,50 DM
<b>Heft 315:</b>	<b>Bestimmung der Beulsicherheit von Schalen aus Stahlbeton unter Berücksichtigung der physikalisch-nichtlinearen Materialeigenschaften</b> (1980) von <i>W. Zerna, I. Mungan</i> und <i>W. Steffen</i>	14,00 DM
<b>Heft 316:</b>	<b>Versuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit stumpf gestoßener Stahlbetonfertigteilstützen</b> (1980) von <i>H. Paschen</i> und <i>V. C. Zillich</i>	28,00 DM
<b>Heft 317:</b>	<b>Untersuchungen über die Schwingfestigkeit geschweißter Betonstahlverbindungen</b> (1981) Teil 1 Schwingfestigkeitsversuche von <i>G. Rehm, W. Harre</i> und <i>D. Rußwurm</i> Teil 2 Werkstoffkundliche Untersuchungen von <i>G. Rehm</i> und <i>U. Nürnberger</i>	32,00 DM
<b>Heft 318:</b>	<b>Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl</b> Technologische Eigenschaften von kaltgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl nach einer Feuerverzinkung (1981) von <i>U. Nürnberger</i>	17,50 DM
<b>Heft 319:</b>	<b>Vollstöße durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstählen in Normalbeton</b> von <i>M. Betzle, S. Stöckl</i> und <i>H. Kupfer</i> <b>Vollstöße durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstählen in Leichtbeton</b> von <i>S. Stöckl, M. Betzle</i> und <i>G. Schmidt-Thrö</i> <b>Verbundverhalten von Betonstählen — Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen</b> von <i>H. Martin</i> und <i>P. Noakowski</i> <b>Ermittlung der Verbundspannungen an gedrückten einbetonierten Betonstählen</b> (1981) von <i>F. P. Müller</i> und <i>W. Eisenbiegler</i>	47,00 DM
<b>Heft 320:</b>	<b>Erläuterungen zu DIN 4227 Spannbeton</b> , Ausgabe Dezember 1979 Teil 1 — Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung Teil 5 — Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle (1980) zusammengestellt von <i>D. Bertram</i>	32,00 DM
<b>Heft 321:</b>	<b>Leichtzuschlag-Beton mit hohem Gehalt an Mörtelporen</b> (1981) von <i>H. Weigler, S. Karl</i> und <i>Ch. Jaegermann</i>	11,50 DM
<b>Heft 322:</b>	<b>Biegebemessung von Stahlleichtbeton — Ableitung der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone aus Prismenversuchen als Grundlage für DIN 4219</b> von <i>Emil Grasser</i> und <i>Peter Probst</i> <b>Versuche zur Aufnahme der Umlenkkräfte von gekrümmten Bewehrungsstäben durch Betondeckung und Bügel</b> (1981) von <i>Josef Neuner</i> und <i>Siegfried Stöckl</i>	27,00 DM
<b>Heft 323:</b>	<b>Zum Schubtragverhalten stabförmiger Stahlbetonelemente</b> (1981) von <i>Rainer Mallée</i>	20,00 DM
<b>Heft 324:</b>	<b>Wärmeausdehnung, Elastizitätsmodul, Schwinden, Kriechen und Restfestigkeit von Reaktorbeton unter einachsiger Belastung und erhöhten Temperaturen</b> von <i>Helmut Aschl</i> und <i>Siegfried Stöckl</i> <b>Versuche zum Einfluß der Belastungshöhe auf das Kriechen des Betons</b> (1981) von <i>Siegfried Stöckl</i>	29,50 DM
<b>Heft 325:</b>	<b>Großmodellversuche zur Spanngliedreibung</b> (1981) von <i>Heiner Cordes, Karl Schütt</i> und <i>Heinrich Trost</i>	20,00 DM
<b>Heft 326:</b>	<b>Blockfundamente für Stahlbetonfertigteilstützen</b> (1981) von <i>Hannes Dieterle</i> und <i>Alfred Steinle</i>	18,00 DM
<b>Heft 327:</b>	<b>Versuche zur Knicksicherung von druckbeanspruchten Bewehrungsstäben</b> (1981) von <i>Josef Neuner</i> und <i>Siegfried Stöckl</i>	16,00 DM
<b>Heft 328:</b>	<b>Zum Tragfähigkeitsnachweis für Wand-Decken-Knoten im Großtafelbau</b> (1982) von <i>Ernst Hasse</i>	27,00 DM

- Heft 329:** Sachstandbericht „Massenbeton“, aufgestellt von Deutscher Beton-Verein E.V.  
Untersuchungen an einem über 20 Jahre alten Spannbetonträger der Pliensaubücke Esslingen  
am Neckar (1982)  
von Kurt Schäfer und Hartmut Scheef 16,00 DM
- Heft 330:** Zusammenstellung und Beurteilung von Meßverfahren zur Ermittlung der Beanspruchungen in  
Stahlbetonbauteilen (1982)  
von Heinrich Twelmeier und Jörn Schneefuß 22,50 DM
- Heft 331:** Kleben im konstruktiven Betonbau (1982)  
von Gallus Rehm und Lutz Franke 23,00 DM
- Heft 332:** Anwendungsgrenzen von vereinfachten Bemessungsverfahren für schlanke, zweiachsig ausmit-  
tig beanspruchte Stahlbetondruckglieder  
von Poul Colberg Olsen und Ulrich Quast  
Traglast von Druckgliedern mit vereinfachter Bügelbewehrung unter Feuerangriff  
von Ataman Haksever und Rüdiger Haß  
Traglast von Druckgliedern mit vereinfachter Bügelbewehrung unter Normaltemperatur und  
Kurzzeitbeanspruchung (1982)  
von Karl Kordina und Rudolf Mester 28,00 DM
- Heft 333:** Festschrift „75 Jahre Deutscher Ausschuß für Stahlbeton“  
von Dieter Bertram, Erich Bornemann, Norbert Bunke, Hanno Goffin, Dieter Jungwirth, Karl  
Kordina, Herbert Kupfer, Jörg Schlaich, Bernhard Wedler †, und Wolfgang Zerna (1982) 42,00 DM
- Heft 334:** Versuche an Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und  
Torsion (1982)  
von Manfred Teutsch und Karl Kordina 19,00 DM
- Heft 335:** Versuche zum Tragverhalten von segmentären Spannbetonträgern – Vergleichende Auswer-  
tung für Epoxidharz- und Zementmörtelfugen (1982)  
von Herbert Kupfer, Klaus Guckenberger und Ferdinand Daschner 20,00 DM
- Heft 336:** Tragfähigkeit und Verformung von Stahlbetonbalken unter Biegung und gleichzeitigem Zwang  
infolge Auflagerverschiebung (1982)  
von Karl Kordina, Ferdinand S. Rostásy und Björn Svensvik 20,00 DM
- Heft 337:** Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen – Behaviour of Concrete at High  
Temperatures (1982)  
von Ulrich Schneider 29,00 DM